

Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Michael Reichel

aus Görlitz

Eingereicht am:	16. 4. 2013
Mündliche Prüfung am:	12. 11. 2013
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer Prof. Dr. Berthold Färber

2013

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik (IFR) der Universität Braunschweig, wobei ich das Glück hatte, vollständig in die Forschungsgemeinschaft des „Projekthauses Fahrerassistenzsysteme“ der AUDI AG in Ingolstadt eingebettet gewesen zu sein.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Janine und meiner Tochter Leonie, die für genug Stabilität, Rückhalt und Fröhlichkeit gesorgt haben, damit dieses Werk entstehen konnte. Meinen Eltern, Schwiegereltern und Freunden danke ich für all den Rückhalt vor allem während des Schreibens und der Vorbereitung der Verteidigung.

Herrn Professor Dr. Markus Maurer danke ich für die Betreuung der Arbeit und das große Vertrauen, dass er mir nach wie vor weit über die Doktorarbeit entgegenbringt. Professor Dr. Berthold Färber gilt mein Dank für die Begleitung der Studie und die Übernahme des Korreferats.

Die Dissertation entstand in einem Umfeld, in dem Professionalität genauso wichtig ist wie Kameradschaft und Kreativität. In diesem Sinne bin ich aunahmslos allen im Projekthaus FAS in Ingolstadt dankbar, dass sie diese Atmosphäre aufbauten und erhalten. Stellvertretend seien an dieser Stelle Dr. Siedersberger, Dr. Bouzouraa, Hr. Siegel und Dr. Hofmann genannt, die mich in zahlreichen Diskussionen auf den richtigen Weg lenkten und förderten. Zudem danke ich Dr. Bouzouraa für seine exzellenten Vorarbeiten und motivierenden Worte während der fordernden Phasen! Den Studenten, deren Abschlussarbeiten ich betreuen durfte, danke ich für ihren Fleiß und ihr Mitdenken - Ihr habt alle dazu beigetragen, dass meine Konzepte mit Versuchen auf Realdaten bestätigt werden konnten! Namentlich gilt mein Dank Hr. Rauschecker, Hr. Altmann, Hr. Korsunov, Hr. Gogol sowie Hr. König.

Zum Schluss möchte ich noch zwei Personen danken, die das sicher nicht erwarten: Frau Blau und Frau Stockmann. Beide legten schon früh die Grundsteine für meinen Erfolg. Danke!

Inhaltsverzeichnis

I	Einführung	1
1	Einleitung	2
1.1	Ein Plädoyer für Fahrerassistenzsysteme	2
1.2	Motivation	4
1.3	Begriffsdefinitionen	4
1.4	Rahmenbedingungen	6
1.5	Wissenschaftliche Zielsetzungen	7
1.6	Aufbau der Arbeit	8
1.7	Notation	8
2	Stand der Technik	10
2.1	Ausgewählte europäische Forschungsprojekte	11
2.2	Ausgewählte deutsche Forschungsgruppen	23
2.3	Weltweite Forschungsleistungen	29
2.4	Forschung zur Erkennung von Einfädelsituationen	32
II	Aufgaben und Strukturierung der Situationsanalyse	34
3	Aufgabenstellungen im Entwicklungsprozess	36
4	Funktionale Aufgabenstellungen	40
4.1	Begriffsdefinitionen	40
4.2	Funktionale Gesamtarchitektur für fortschrittliche FAS	42
4.3	Funktionale Architektur innerhalb der Situationsanalyse	48
4.4	Beispielhafte Anwendung der gefundenen Strukturierung	54
III	Situationsanalyse für eine aktive Gefahrenbremsung	57
5	Gesamtkonzept des Assistenzsystems	58
5.1	Ziele und Nutzen	58

5.2	Aufbau des Systems	60
5.3	Relevante Situationsaspekte	63
5.4	Szenarienübersicht	65
5.5	Methodenwahl	68
6	Definitionen und Modelle	72
6.1	Koordinatensysteme	72
6.2	Intervallbasierte Umfeldrepräsentation	72
6.3	Definitionen zur Erreichbarkeitsmenge	75
6.4	Bewegungsmodell für die Prädiktion	78
6.5	Modellierung der Eigenbewegung	80
6.6	Modellierung der Fremddynamik	85
6.7	Formmodelle	85
7	Probandenstudie zum Grenzverhalten bei Tordurchfahrten	87
7.1	Stand der Forschung	87
7.2	Hypothesen und Vorhersagen	88
7.3	Aufbau und Ablauf der Studie	88
7.4	Ergebnisse	91
7.5	Diskussion	92
8	CoBRA-Algorithmus zur Berechnung der Erreichbarkeitsmenge	95
8.1	Extraktion in die intervallbasierte Belegungsliste	95
8.2	CoBRA-Kern am Beispiel der einfach-statischen Interaktion	97
8.3	CoBRA-Algorithmus für komplex-dynamisch-statische Interaktionen	105
9	Ergebnisse auf der Basis von Realszenarien	113
9.1	Ergebnisse aus Szenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“	113
9.2	Ergebnisse aus Szenario Ib - „Stauende mit unaufmerksamem Fahrer“	117
9.3	Ergebnisse aus den Szenarien II und III - „Geschlossene und geöffnete Gasse“	117
9.4	Ergebnisse aus Szenario IV - „Bewegtes Stauende“	121
10	Diskussion der Ergebnisse	127
11	Ausblick: Erweiterung um die Funktion einer Ausweichassistentz	129
IV	Situationsanalyse für eine Komfortfunktion	131
12	Erkennung einer Einfädelsituation als Teil der Situationsanalyse	132
12.1	Motivation und Nutzen	132
12.2	Systemübersicht	134
12.3	Methodenwahl	135

12.4 Vorgehensweise beim Aufbau des Klassifikators	138
13 Theoretische Grundlagen	140
13.1 Statistisches Rahmenwerk	140
13.2 Scenario-Based Random Forest	143
13.3 Merkmalsselektion	144
13.4 Allgemeines Modell einer (Teil-)Situation	145
13.5 Definition der Einfädelsituation	146
13.6 Modellierung der Einfädelsituation	147
14 Methoden der Merkmalsgenerierung	153
14.1 Radar-Reflex-Histogramme	153
14.2 Kolonnenspuren	154
14.3 Detektion von Kolonnenspurwechslern (KSW)	159
15 Klassifikatordesign und Ergebnisse auf der Basis von Realdaten	161
15.1 Datenbasis und Vergabe von Label	161
15.2 Vergleich CART und SBRF	162
15.3 Einfluss eines Oversamplings der Klasse EFS	164
15.4 Einfluss der Transitionsklasse ?EFS	165
15.5 Merkmalsselektion	165
15.6 Klassifikationsergebnisse	168
15.7 Diskussion der Ergebnisse	170
 V Zusammenfassung und Ausblick	 171
 Anhang	 174
A Versuchsfahrzeuge	175
B Bilderreihe der Tordurchfahrt	177
C Dynamische Bewegungsmodelle	178
D Komprimierung der Schnittmengenbildung des <i>CoBRA</i>-Algorithmus	181
E Klothoidenapproximation	184

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	9
2.1	Übersicht der relevanten Forschungsprojekte	11
3.1	Systematische Softwareentwicklung nach dem V-Modell	37
3.2	Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen im Zusammenspiel der Vor- und Serienentwicklung	38
3.3	Top-Down orientierter Entwicklungsprozess für aktive Sicherheitssysteme .	38
4.1	Verhaltensmodell der menschlichen Fahrzeugführung	43
4.2	Funktionale Gesamtsystemarchitektur nach Siedersberger (2003)	44
4.3	Funktionale Gesamtsystemarchitektur nach Stiller u. a. (2008a)	45
4.4	Grobe Funktionale Systemarchitektur zur Einordnung der Situationsana- lyse in den Gesamtkontext	46
4.5	Modell des menschlichen Entscheidungs- und Handlungsprozesses	47
4.6	Detaillierung der Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse	51
4.7	Architekturdetaillierung am Beispiel einer Stauassistentz	55
4.8	Architekturdetaillierung am Beispiel einer aktiven Gefahrenbremsung . . .	56
5.1	Belegungskartenbasierte Eingangsinformation	62
5.2	Eingangsinformationen über dynamische Verkehrsteilnehmer	62
5.3	Eingangsinformationen über den Fahrerzustand	62
5.4	Zustandsautomat der Verhaltensentscheidung der aktiven Gefahrenbremsung	63
5.5	Ergebnisszenario I - „Stauende“	67
5.6	Ergebnisszenario II - „Geschlossene Gasse“	67
5.7	Ergebnisszenario III - „Geöffnete Gasse“	67
5.8	Ergebnisszenario IV - „Bewegtes Stauende“	67
5.9	Dilemma der Einzeltrajektorienverfahren	70
6.1	Genutzte Koordinatensysteme	73
6.2	Beispiel einer intervallbasierten Umfeldrepräsentation	74
6.3	Intervallbasierte Umfeldrepräsentationen	76
6.4	Erreichbarkeitsmenge mit beispielhaften Fahrzeugpositionen	77
6.5	Maximale Erreichbarkeitsmenge \hat{R} und deren Rand $\delta\hat{R}_n$	78
6.6	Gekrümmtes Bahnmodell	79

6.7	Experimentelle Ergebnisse aus genormten Fahrversuchen	81
6.8	Modellierung des Querschleunigungsverlaufes über die Zeit, beispielhaft zum Zeitpunkt einer Kurvenfahrt mit $a^n(0) \neq 0$	81
6.9	Querschleunigungsverläufe von Notausweichmanövern	83
6.10	Normalbeschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	83
6.11	Modellierung der Normalbeschleunigung für das EGO	84
6.12	Modellierung der Normalbeschleunigung für Fremdfahrzeuge	85
7.1	Beschreibung des Probandenpools	89
7.2	Studienablauf innerhalb der Versuchsphase	90
7.3	Versuchsergebnisse der Tordurchfahrt	92
8.1	Verarbeitungsstufen des <i>CoBRA</i> -Algorithmus	96
8.2	Beispiele für die Vorgabe des Extraktionsbereiches	98
8.3	Beispielergbnis des <i>CoBRA</i> -Kernalgorithmus	99
8.4	Visualisierung der Arbeitsschritte des <i>CoBRA</i> -Kerns	100
8.5	Möglichkeiten der Schnittmengenbildung	104
8.6	Extremtrajektorien und resultierende sichere Aufenthaltsgebiete	106
8.7	Ablauf zur Berechnung der sicheren Aufenthaltsgebiete unter Beachtung dynamischer wie statischer Interaktionen	108
8.8	Beispiele der Interaktionstypen	108
8.9	Iterationslose Synthese des sicheren Aufenthaltsgebietes	111
9.1	Ergebnisse für das Szenario Ia, Gesamtzeitraum	115
9.2	Ergebnisse für das Szenario Ia, Auslösephase	116
9.3	Ergebnisse für das Szenario Ib, Gesamtzeitraum	118
9.4	2D Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario Ia	119
9.5	3D Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario Ia	119
9.6	2D Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario Ib	120
9.7	3D Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario Ib	120
9.8	Ergebnisse für die Szenarien II und III, Gesamtzeitraum	121
9.9	2D Visualisierung der Datenstrukturen für die Szenarien II und III	122
9.10	Ergebnisse für das Szenario IV, Gesamtzeitraum	124
9.11	Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario III zum Zeitpunkt $t_{Kritisch}^{Erweitert} = 9,158s$	125
9.12	Visualisierung der Datenstrukturen für das Szenario III zum Zeitpunkt $t_{Unvermeidbar}^{Erweitert} = 9,518s$	126
11.1	Generierte Ausweichbahn zur Ausweichunterstützung	130
12.1	Ansichten einer realen Einfädelsituation	133
12.2	Belegungskartenbasierte Eingangsinformation	136
12.3	Eingangsinformationen über dynamische Verkehrsteilnehmer	136

12.4	Eingangsinformationen über Kolonnenspuren	136
12.5	Vorgehensweise zum Klassifikatordesign	139
13.1	Allgemeines Modell einer (Teil-)Situation	145
14.1	Radar-Reflex-Histogramme vor, während und nach einer EFS	154
14.2	Ablauf der Kolonnenspurbildung auf der Basis einer Intervallkarte	155
14.3	Intervallkarte mit eingetragenen Kolonnenspursesegmenthypothesen	157
14.4	Verfolgung von bekannten Kolonnenspuren	159
14.5	Positivklassifikation eines Kolonnenspurschalters	160
15.1	Videobilder zu den eingefahrenen Szenarien	162
15.2	Relative Merkmalwichtigkeit zu Beginn der Selektion	166
15.3	Klassifikationsfehler $\hat{R}(g)$ bei zunehmender Merkmalsselektion	168
15.4	Klassifikationsergebnis zum Datensatz Nr. 5	169
15.5	Klassifikationsergebnis zum Datensatz Nr. 1	169
A.1	Versuchsfahrzeug für die aktive Gefahrenbremsung	176
C.1	Vergleich der Bewegungsmodellierungen	179
C.2	Ergebnisvergleich der dynamischen Modelle	180
D.1	Lagepositionen für die Schnittmengenbildung des <i>CoBRA</i> -Algorithmus	181
D.2	Permutation aller Lagebeziehungen	182
D.3	Zusammengehörige Fälle der Lagebeziehungen	183

Tabellenverzeichnis

4.1	Literaturübersicht zu behandelten Aufgabengebieten der Situationsanalyse	50
5.1	Schnittstelle zwischen der Verhaltensentscheidung und der Situationsanalyse und damit relevante Situationsaspekte für die aktive Gefahrenbremsung	64
7.1	Deskriptive Statistik zum Torversuch	93
7.2	Einfaktorielle Varianzanalyse zum Torversuch	93
7.3	Ermittelte Parameter der Lückenbreiten für eine aktive Gefahrenbremsung	94
8.1	Parametergestaltung für die Situationsanalyse	98
13.1	Erwartungswert, Standardabweichung und Bereich aller Merkmale	152
15.1	Übersicht zur Datenbasis	162
15.2	Konfusionsmatrix des SBRF	163
15.3	Konfusionsmatrix des CART	163
15.4	oob-Erwartungswert für Verschiedene EFS:!EFS Wichtungen	164
15.5	Konfusionsmatrix für die Wichtung EFS:!EFS=(1:x)	164
15.6	Konfusionsmatrix für die Wichtung EFS:!EFS=(1:1)	165
15.7	Konfusionsmatrix nach einem Training unter Einschluss der ?EFS Daten .	165
15.8	Ergebnisse von zehn Durchgängen der Merkmalsselektion	167

Symbolverzeichnis

$\Delta^{(j)}$	Differenz des Generalisierungsfehlers bei Herauslassung des Merkmals j
\mathcal{L}	Kostenfunktion im Rahmen der Klassifikation
Ω	Menge möglicher Attribute für Abschnitte einer Intervallkarte
\mathcal{T}	Trainingsset
$\lambda_{n,m}$	y-Wert der linken Grenze eines Abschnittes m eines Streifens n einer Intervallkarte
$\lambda_{n+1,m}^{pot}$	y-Wert der potentiellen linken Grenze eines Abschnittes m im nachfolgenden Streifen n+1 einer Intervallkarte
ω	Einem Abschnitt zugewiesene Attribute
$\dot{\varphi}(t)$	Giergeschwindigkeit
$\dot{\varphi}_{mess}$	Gemessene Giergeschwindigkeit
φ	Ausrichtung des Geschwindigkeitsvektors
$\rho_{n,m}$	y-Wert der rechten Grenze eines Abschnittes m eines Streifens n einer Intervallkarte
$\rho_{n+1,m}^{pot}$	y-Wert der potentiellen rechten Grenze eines Abschnittes m im nachfolgenden Streifen n+1 einer Intervallkarte
A_{Fzg}	Sicheres Aufenthaltsgebiet eines Fremdfahrzeuges
\mathbf{A}_{KS}	Systemmatrix eines Kalmanfilters
B	Mittels Intervallkarte beschriebene Belegung der Umgebung
B^{frei}	Mittels Intervallkarte beschriebene Freibereiche
B_n	Streifen n einer Intervallkarte
B_n^{frei}	Streifen n einer Intervallkarte, die nur Freibereiche beinhaltet
$B_{n,m}$	Abschnitt m innerhalb eines Streifens n einer Intervallkarte

$B_{n,m}^{frei}$	Abschnitt m innerhalb eines Streifens n einer Intervallkarte, der das Attribut frei trägt
K	Verkehrsdichte über die gesamte Fahrbahn
L	Anzahl an Signalen eines Szenarien-Auschnittes
M	Anzahl aller vorliegenden Szenarien
M	Anzahl an Abschnitten eines Streifens n einer Intervallkarte
M'	Szenarien zum Training eines Klassifikators
N	Anzahl
\mathbf{P}_{KS}	Kovarianzmatrix eines Kalmanfilters
Q	Verkehrsstärke über die gesamte Fahrbahn
\mathbf{Q}_{KS}	Rauschmodell für das System eines Kalmanfilters
R	Mittels Intervallkarte beschriebene Erreichbarkeitsmenge
$R(f)$	Risikofunktional
$R(g)$	Risiko der speziellen Abbildungsaufgabe g
R^{pot}	Mittels Intervallkarte beschriebene potentielle Erreichbarkeitsmenge
R_n	Streifen n der Erreichbarkeitsmenge
R_n^{pot}	Potentieller Streifen n der Erreichbarkeitsmenge
$R_{n,m}$	Abschnitt m innerhalb eines Streifens n der Erreichbarkeitsmenge
$R_{n,m}^{pot}$	Potentieller Abschnitt m innerhalb eines Streifens n der Erreichbarkeitsmenge
$\bar{\hat{R}}$	Das Innere der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge
$\delta\hat{R}$	Rand der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge
\hat{R}	Maximal mögliche Erreichbarkeitsmenge
$\hat{R}(f)$	Näherung des Risikofunktionals
$\hat{R}(g)$	Generalisierungsfehler
\hat{R}_n°	Abschluss der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge
\hat{R}_n	Streifen n der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge
\mathbf{R}_{KS}	Rauschmodell des Sensors eines Kalmanfilters
\mathbf{S}	Szenario

$\mathbf{S}[n]$	Szenarien-Ausschnitt
T	Zeitintervall
T_k	Zeitintervall
\mathbf{X}_{KSSH}	Zustandsvektor eines Kalmanfilters
$\tilde{\mathbf{X}}$	Merkmalsrepräsentation eines Szenarios \mathbf{S}
\mathbf{X}'	Reduzierter Merkmalsraum
a	Beschleunigung
a^n	Beschleunigung in normaler Richtung
a_{mess}^n	Gemessene Beschleunigung in normaler Richtung
a_{max}^n	Maximum der Beschleunigung in normaler Richtung
a^t	Beschleunigung in tangentialer Richtung
b	Breite einer Lücke
f	Klassifikationsfunktion
g	Abbildung
j^n	Ruck in normaler Richtung
k_i	Verkehrsdichte im Fluss i
m	Index eines Abschnittes innerhalb einer Intervallkarte
n	Index eines Streifens innerhalb einer Intervallkarte
n	Zeitschritt
pot	Index für einen durch Prädiktion gewonnenen potentiellen Teil der Erreichbarkeitsmenge
q_i	Verkehrsstärke im Fluss i
r	Kurvenradius
$\mathbf{s}_\ell[n]$	Zeitserie eines Sensordatums
s_{Brems}	Bremsweg
$s_{Extraktionsgrenze}$	Länge des extrahierten Bereiches
$s_{Vorausschau}$	Zusätzliche Zeitlücke
t	Zeit

v	Geschwindigkeit über Grund
v_i	Mittlere Reisegeschwindigkeit im Fluss i
v_{EGO}	Geschwindigkeit über Grund des eigenen Fahrzeuges
v_{mess}	Gemessene Geschwindigkeit über Grund
$v_{x,A}$	Geschwindigkeit in longitudinaler Richtung eines Fremdfahrzeuges A
$v_{x,B}$	Geschwindigkeit in longitudinaler Richtung eines Fremdfahrzeuges B
$\tilde{\mathbf{x}}[n]$	Merkmalsvektor
x	Position auf der longitudinalen Achse
$\hat{y}[n]$	Klasse
y	Position auf der lateralen Achse
$y[n]$	Klassifikationsergebniss im Zeitschritt n
y_A	Laterale Position des Bezugspunktes eines Fremdfahrzeuges A
y_B	Laterale Position des Bezugspunktes eines Fremdfahrzeuges B

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADTF	Automotive Data and Time Triggered Framework
AFK	Aufnehmende Fahrzeugkolonne
AGB	Aktive Gefahrenbremsung
AKTIV	Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr
AOM	Adaquate Overtaking Margin
CART	Classification And Regression Tree
CBR	Case-Based Reasoning
CoBRA	Computation of Boundaries of the Reachability Area
DAMN	Distributed Algorithm for Mobile Navigation
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DBN	Dynamic Bayesian Network
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
EFS	Einfädelsituation
EGO	Das Fahrzeug, in dem das beschriebene Assistenzsystem agiert
FAS	Fahrerassistenzsystem
HAVEit	Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport
INVENT	INtelligenter VERkehr und Nutzergerechte Technik
KogMo-RTDB	Real-Time Database for Cognitive Automobiles
KS	Kolonnenspur
KSH	Kolonnenspurchypothese
KSS	Kolonnenspursegment

KSSH	Kolonnenspursesegmenthypothese
MFK	Migrierende Fahrzeugkolonne
MLN	Markov Logic Network
MS	Merkmalsselektion
oob	out-of-bag
PFSM	Probabilistic Finite-Statemachines
Prometheus	PROgraMe for an European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety
RF	Random Forest
RONNY	Road Network Ontology
RRH	Radar-Reflex-Histogramm
SBRF	Scenario-Based Random Forest
SFB	Sonderforschungsbereich
SiA	Situationsanalyse
TTB	Time To Brake
TTC	Time To Collision
TTD	Time To Disappear
TTE	Time To Enter
TTK	Time To Kickdown
TTR	Time To React
TTS	Time To Steer

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt drei Fragestellungen aus dem Themenfeld der Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme. Der erste Schwerpunkt liegt auf der Erarbeitung einer funktionalen Architekturdetaillierung für die Situationsanalyse. Hierfür wird zunächst die Stellung der Situationsanalyse im Gesamtsystem eines fortschrittlichen Fahrerassistenzsystems aufgezeigt, um im Anschluss die funktionale Architektur innerhalb der Situationsanalyse aufzuschlüsseln. In diesem Zuge werden neun Aufgaben der Situationsanalyse aus der Literatur und eigenen Erfahrungen identifiziert, definiert und strukturiert.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet die Vorstellung eines neuen Algorithmus zur Berechnung der Grenzen des kollisionsfrei erreichbaren Raumes. Er bildet den zentralen Kern der Situationsanalyse für die Funktion einer aktiven Gefahrenbremsung. Der Algorithmus zeichnet sich dadurch aus, dass er sowohl beliebig strukturierte statische Hindernisse als auch dynamische Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Zudem beachtet er deren Interaktionsbeziehungen und die Aufmerksamkeit des Fahrers. Im Zuge der Modellierung fließen auch neue Erkenntnisse über den Einfluss der Breite einer zu durchfahrenden Lücke ein, die aus einer eigenen Studie hierzu stammen. Kommt der Algorithmus zum Ergebnis, dass der kollisionsfrei erreichbare Raum vollständig durch Hindernisse begrenzt ist – es also keine Ausweichmöglichkeit gibt – so ist ein wesentliches Kriterium für den Einsatz einer automatischen Notbremse erfüllt. Auf mehreren Präsentationen war diese echtzeitfähig implementierte Situationsanalyse elementarer Bestandteil der vorgestellten Technik, mit der gerechtfertigte und unfallvermeidende automatische Bremsungen in den Stillstand auch bei Differenzgeschwindigkeiten oberhalb von $60 \frac{km}{h}$ möglich werden.

Der dritte Teil der Dissertation adressiert eine bislang noch ungelöste Herausforderung für die Situationsanalyse von Fahrerassistenz-Komfortsystemen: Die Erkennung einer Einfädelsituation aus der Perspektive eines involvierten Fahrzeuges. Auf die Modellierung der Merkmale als auch des Klassifikators wird ausführlich eingegangen. Im Zuge dessen wird das im Forschungsbereich der Fahrerassistenz noch unbekannte Klassifikationsverfahren “Scenario Based Random Forest“ vorgestellt und beurteilt. Abschließend kann gezeigt werden, dass der Erkennungsalgorithmus in 92% der Fälle zum richtigen Ergebnis führt.

Für die beiden speziellen Situationsanalysen wird die Anwendung der im ersten Teil erarbeiteten funktionalen Architekturdetaillierung exemplarisch angewendet. Des weiteren basieren sämtliche Ergebnisse auf real aufgezeichneten Sensordaten.

Abstract

This work addresses three issues in the research area of situation analysis for advanced driver assistance systems. The focus of the first part is on the development of a detailed functional architecture for situation analysis. Therefore, the situation analysis' embedding in the overall system is shown. The functional architecture within the situation analysis is developed afterwards. Nine tasks for analysing a situation for driver assistance systems are identified, defined and structured based on literature and own experiences.

The second part of this work introduces a new algorithm for calculating the borders of the collision-free reachability area. This algorithm forms the central piece of the situation analysis of an active hazard braking function. It considers arbitrary structured static obstacles, dynamic road users, their interaction relationships as well as the driver's state of attention. The influence of narrow gap's widths between obstacles in the context of evasion manoeuvres were addressed in a new study and incorporated in the modeling of the algorithm. If the result of the computation indicates that the collision-free reachability area is completely limited by obstacles – in other words that no collision free track exists – an essential criterion for the use of an automatic emergency brake is met. The results were shown on several presentations with a real vehicle using such an active hazard braking system. It demonstrated warrantable full stop collision avoiding braking interventions even at differential speeds above $60\frac{km}{h}$.

The third part of the thesis addresses a yet unsolved challenge in the scope of situation analysis for driver assistance systems improving driving comfort: the detection of convoy merging situations from the perspective of an involved vehicle. Within the development of such a classification algorithm, the method "Scenario based random forest" is introduced, which is yet unknown in the research field of driver assistance systems. This thesis describes the modeling of the situation and hence the features used for the classification as well as the training of the classifier in detail. The results show, that the convoy merging situations are classified correctly in 92% of given samples.

The functional architecture described in part one is exemplary applied for both situation analysis of part two and three. In addition, all presented results were obtained by using real-world sensor data.

Teil I

Einführung

1 Einleitung

1.1 Ein Plädoyer für Fahrerassistenzsysteme

Jeder Nutzer eines Pferdeantriebes kann auf eine Vielzahl von Assistenzsystemen zurückgreifen, die in modernen motorgetriebenen Fahrzeugen separat ausgewiesen werden. So halten Pferde von selbst einen Sicherheitsabstand und bremsen gegebenenfalls auch bis in den Stillstand, um einen Unfall zu verhindern. Sie sind sogar in der Lage, einen verletzten Reiter selbständig nach Hause zu bringen. Im Wesentlichen hat man mit der Einführung motorgetriebener Fahrzeuge im Jahr 1885 zwar die Muskeln ersetzt, aber gleichzeitig auf die Augen, Ohren und das Hirn des Pferdes verzichtet. Erst mit technischen Innovationen am Ende des letzten Jahrhunderts ist es möglich geworden, auch Pendants hierfür zu finden. So begannen Fahrzeuge im Jahr 1993 mit Ultraschallsensoren erstmals ihre nähere Umgebung abzuhören. In die Ferne blickten Serienfahrzeuge zum ersten Mal im Jahr 1995, als Mitsubishi den Abstandsregeltempomaten einführte (Mitsubishi (1995)). Seitdem hielten auch laser-, lidar- und kamerabasierte Systeme Einzug ins Auto und erweiterten so dessen Sinne. Auf dem Gebiet der Datenspeicherung und -verarbeitung ermöglichen aktuelle Steuergeräte die Nutzung von Wahrnehmungsmethoden, die ein immer detaillierteres Abbild des Umfeldes sowie des Zustandes des eigenen Fahrzeuges und dessen Insassen zeichnen. Diese Zunahme an Informationen eröffnet fortlaufend mehr Möglichkeiten für moderne Fahrerassistenzsysteme.

Die Nutzung solcher fortschrittlichen Assistenzsysteme hat vielschichtige Motivationen. Einerseits ist es der Komfortzuwachs, den ein Fahrer zum Beispiel mit einem Abstandsregeltempomaten erleben kann. Zum anderen gehört auch die gefühlte Steigerung der Sicherheit zum individuellen Fahrerlebnis. Die Auswirkungen der Assistenznutzung sind aber auch volkswirtschaftlich interessant. Die im Stau verbrachte Zeit produktiv zu nutzen, den Durchsatz auf dicht befahrenen Straßen zu erhöhen oder den Schaden durch Verkehrstote und -verletzte sowie die Sachschäden zu verringern - all das versprechen moderne Fahrerassistenzsysteme. Die Unfallforschung der Versicherer geht davon aus, dass mit Notbremsassistenten bis zu 15% der Unfälle verhindert werden können (GDV (2012)). Statistisch gesehen sank die Zahl der Verkehrstoten nach Berechnungen der OECD international von 103.943 im Jahr 2008 auf 96.273 im Jahr 2009. Bemerkenswerterweise ging die Anzahl gerade in der letzten Dekade - und damit in der Zeit, in der sich Assistenzsysteme etablierten - signifikant zurück. Während zwischen 2000 und 2009 die Zahl der im Straßenverkehr tödlich verunglückten Personen um 18,2% verringert werden konnte,

zeigen die vorherigen Dekaden nur einstellige Rückgänge auf: 2,95% (1990-1999); 1,66% (1980-1989); 0,08% (1970-1979) sowie 0,18% (1960-1969). Allein in Deutschland starben 2009 45% weniger Menschen im Straßenverkehr als noch im Jahr 2000, obwohl die Anzahl der zugelassenen PKW sich nur leicht von 52,5 Millionen auf 50,2 Millionen reduzierte. Ebenso ging die Anzahl der polizeilich erfassten Unfälle von 2,35 Millionen (2000) auf 2,31 Millionen (2009) zurück, obgleich auf Deutschlands Straßen schon im Jahr 2008 663 Mrd. km und damit 27 Mrd. km mehr als noch im Jahr 2000 zurückgelegt wurden. Betrachtet man die Summe aller volkswirtschaftlich relevanten Personen- und Sachschäden aufgrund von Unfällen, so zeigt sich in der letzten Dekade ein signifikanter Rückgang von 41,6 Mrd. Euro im Jahr 1998 auf 14,04 Mrd. Euro im Jahr 2008 (1998: 68 Mrd. DM; 1,95583 DM = 1 Euro; Inflationsbereinigt). Auch wenn die Unfall- und Kostenstatistiken keinen Rückschluss auf den direkten Einfluss der genutzten Fahrerassistenzsysteme zulassen - wenn die positiven Trends fortgeschrieben werden sollen, dann müssen moderne Fahrerassistenzsysteme ihre Versprechen einlösen.¹

Ein Blick in die Zukunft lässt erahnen, dass die Entwicklung von Assistenzsystemen auch aus unternehmerischer Sicht bedeutsamer werden wird. Zukunftsstudien des Institutes für Mobilitätsforschung gehen in ihrem Szenario „Aktion“ für das Jahr 2020 davon aus, dass sich die Einstellung zum Auto ändert (Vgl. ifmo (2010, 2002)). Während es heute noch einen stark emotionalen Charakter besitzt und als Statussymbol gilt, sehen die Menschen im Jahr 2020 das Auto als Teil eines Mobilitätskonzeptes, wobei nicht das Eigentum am Fahrzeug, sondern dessen zielgerichtete Nutzung im Vordergrund steht. Car-Sharing-Angebote entwickeln sich aus der Nische zu wirtschaftlich relevanten Geschäftsfeldern. Daraus lässt sich ableiten, dass Fahrzeughersteller in Zukunft täglich um die Gunst der Kunden konkurrieren, statt sie bei singulären Kaufentscheidungen überzeugen zu müssen. Mit dem Rückgang der emotionalen Bindung wird das Design des Fahrzeuges nicht mehr dominieren, vielmehr rücken unter anderem die intelligenten Helfer in das Blickfeld der Nutzer. Ein Fahrzeug das gestern einen Unfall verhinderte, weil ich abgelenkt war?! - das werde ich morgen auch mieten!

Des Weiteren spricht die zunehmende Alterung der Gesellschaft für den erweiterten Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, wenn diese dem Anspruch gerecht werden können, gerade in komplexen und überfordernden Situationen helfen zu können. Während die Vorkriegsgeneration noch ohne Auto aufgewachsen ist, haben sich nachfolgende Generationen an dessen Nutzung gewöhnt. 1969 hatte jeder Fünfte im Westen Deutschlands ein Auto, 1971 war es jeder Vierte und 1977 sogar schon jeder Dritte. Auch wenn Mobilitätsanforderungen aus beruflichen Gründen im Rentenalter wegfallen, werden die Menschen versuchen, so lange wie möglich Auto zu fahren. Und gerade für diese Zielgruppe könnte eine Assistenzfunktion Bedeutung erlangen, die auch der Nutzer eines Pferdeantriebes im 19. Jahrhundert zuweilen gerne in Anspruch genommen hat: Autonom ans Ziel gefahren zu werden, wenn man sich selbst dazu nicht mehr in der Lage fühlt.

¹ Um die Lesbarkeit zu erhöhen, werden die Quellen der Statistiken ausnahmsweise gesammelt angegeben: OECD (2010), KBA (2010, 2001), StatBA (2010a,b), BASt (2010, 2000), BGL (2007)

1.2 Motivation

Durch die Einführung neuer Sensortechnologien steigt das im Fahrzeug repräsentierte Wissen über sich und seine Umgebung stetig an. Beispielhaft seien hier das Photonik Mixed Device, der Lasersensor, der Lidar oder auch Rotpixelkameras angeführt. Des Weiteren ermöglichen die gestiegenen Rechenleistungen von Personalcomputern als auch automotiver Steuergeräte die Nutzung innovativer Wahrnehmungsmethoden. Hiermit werden beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr nur als bewegter Punkt im Raum abgebildet, sondern ihnen werden auch Ausmaße und Orientierung oder sogar dynamische Formbeschreibungen zugewiesen.² Gitterbasierte Techniken geben explizit Auskunft über beliebig strukturierte Frei- und Belegträume³ und digitale Karten beinhalten Informationen über die Infrastruktur.⁴ Video- und interaktionsbasierte Fahrerbeobachtungen liefern Informationen über den Zustand des Fahrers⁵, Inertialplattformen in Verbindung mit Odometrie und Federwegsensoren ermitteln den Eigenzustand des Fahrzeuges.⁶ Fortschritte in der Kommunikationstechnologie erweitern den Blick über das unmittelbare Umfeld hinaus, indem die Informationen von Fahrzeug zu Fahrzeug oder von der Infrastruktur zum Fahrzeug versendet werden.⁷

Die Zunahme an Informationen über das Umfeld, den Fahrer und das Fahrzeug eröffnet neue Möglichkeiten, Fahrerassistenzsysteme situativ, das heißt von der im jeweiligen Moment existierenden Situation abhängig, zu gestalten. Auf der anderen Seite wird erwartet, dass die Zunahme an verfügbarem Wissen zu einer Verbesserung der Assistenz führt. Dies macht die Situationsanalyse, bei der genau diejenigen Aspekte analysiert werden, die einer Fahrerassistenz zu einer Verbesserung verhelfen, zu einem immer wichtiger werdenden Baustein.

1.3 Begriffsdefinitionen

Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme

Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) sind im Rahmen der Arbeiten des PREVENT Projektes / Teilprojekt Reponse 3 als Systeme definiert worden, die den Fahrer aktiv bei der primären Fahraufgabe unterstützen (Vgl. Winkle u. a. (2007)). Sie konzentrieren sich, basierend auf dem von Donges (1982) entwickelten Modell für das Führen von Kraftfahrzeugen, ausschließlich auf die Assistenz auf

²Vgl. Bouzouraa und Hofmann (2010); Pfeiffer und Franke (2010)

³Vgl. Bouzouraa und Hofmann (2009)

⁴Vgl. Thomas u. a. (2008)

⁵Vgl. Murphy-Chutorian und Trivedi (2010)

⁶Vgl. Baer u. a. (2009)

⁷Vgl. Radusch und Rechner (2010)

der Manöverebene. Des Weiteren unterscheiden sich fortschrittliche von konventionellen Fahrerassistenzsystemen (FAS)⁸ durch die Nutzung von Sensoren für die Umfelderkennung sowie den Gebrauch komplexerer Signalverarbeitungsmechanismen zur Aufbereitung und Interpretation der gewonnenen Umfelddaten. Mit dieser Abgrenzung trug man 2007 dem größer werdenden Umfang von Assistenzsystemen mit Umfelderkennung Rechnung und betonte gleichzeitig die Notwendigkeit einer Umfeldinterpretation.

Situationsanalyse

Das Wort *Situation* leitet sich laut Dudenredaktion (2009) vom französischen Wort „situer“ ab, was mit „in die richtige Lage bringen“ übersetzt wird. Die Autoren des zugehörigen wikipedia Artikels beschreiben die heutige Bedeutung des Wortes als

die „Lage“, die Gebundenheit an Gegebenheiten oder Umstände, vor die jemand [...] gestellt ist und die als konkrete Bedingungen die Möglichkeiten des Tuns [...] begrenzen, allgemein die Befindlichkeit in einer Umgebung, einem Zusammenhang oder einer Abhängigkeit. (Vgl. Wikipedia (2010))

Sie weisen darauf hin, dass die Situation grundsätzlich auf etwas Situiertes bezogen ist - also einen bestimmten Blickwinkel aufweist. Des Weiteren besitzt sie einen Bezug zu einem bestimmten zeitlichen Moment, was sich zum Beispiel in der Nutzung des Wortes „situativ“ zeigt, welches einen Hang zum Spontanen aufweist.

Das Wort *Analyse* entstammt gemäß Kluge und Seebold (1999) aus dem Altgriechischen und leitet sich vom entsprechenden Verb für „auflösen“ ab. Im Griechischen war es ein Begriff der Methodenlehre und bedeutete „etwas auf die Bestandteile zurückführen, aus denen es zusammengesetzt ist“. Diesen Begriff erweiternd, versteht man heute unter einer *Analyse* die

systematische Untersuchung eines Phänomens oder Gegenstands in allen Einzelheiten und Aspekten. (Vgl. Drosdowski und Dudenredaktion (1993))

Für diese Dissertation wird daraus folgende Definition gewonnen:

Die Situationsanalyse untersucht all diejenigen Umstände, die für die Ausführung der angestrebten Fahrerassistenzfunktion zum jeweiligen Zeitpunkt relevant sind.

Die zu Grunde liegende FAS-Funktion ist das Situierte und definiert somit den Blickwinkel für die Analyse. Da sich fortschrittliche FAS durch das Vorhandensein von Daten aus der maschinellen Wahrnehmung auszeichnen, kann die Situationsanalyse als Interpretationsschritt des gesamten vorhandenen Wissens im Hinblick auf die FAS-Funktionsziele betrachtet werden.

⁸Im Deutschen existiert kein spezielles Akronym für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme, vielmehr werden konventionelle und fortschrittliche FAS identisch abgekürzt.

Zu einer sehr ähnlichen Auffassung kommt auch Maurer (2000) bei der Definition des Begriffes der Situationserfassung, wobei in seiner Arbeit die geschichtliche Entwicklung der Definition ausführlicher dargestellt ist:

Die Situationserfassung [analysiert] für das technische System die Situation hinsichtlich der Umstände, die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe in dem jeweiligen Moment relevant sind. (Vgl. auch Maurer (2000))

1.4 Rahmenbedingungen

Die Dissertation entstand im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Braunschweig und der AUDI AG in Ingolstadt, deren Projekte und technische Gegebenheiten die Ausrichtung der Arbeit prägten. Während der Promotionszeit wurde dort an einer automatischen Notbremse gearbeitet, die in beliebig strukturierten statischen Umgebungen durch Warnung und Bremsengriff eine Kollision möglichst vermeiden soll.⁹ Das System konnte auf der Abschlussveranstaltung des zugehörigen BMWI geförderten Projektes AKTIV-AGB¹⁰ erfolgreich demonstriert werden. Als Grundlage der Interpretation des Umfeldes dienten eine gitterbasierte sowie eine objektbasierte Umfeldrepräsentation, die über das statische Umfeld beziehungsweise über das dynamische Umfeld Daten lieferten. Darüber hinaus standen Informationen zum Fahrzeugzustand sowie über den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers zur Verfügung.

In einem zweiten Projekt richteten sich die Forschungsaktivitäten auf das Ziel des autonomen Fahrens. Neben den oben genannten Informationen stand hierzu auch eine videobasierte Fahrstreifenerkennung zur Verfügung. Das Gesamtprojekt zielte auf die Darstellung eines boardautonomen Systems zum fahrerlosen Fahren ab. Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein wichtiger Teilaspekt eines solchen Systems betrachtet: die Detektion von Einfädelsituationen, in denen die Funktion ihr Kooperationsverhalten anpassen muss.

Der Anspruch der Forschungsgruppe um Dr. Karl-Heinz Siedersberger im Projekthaus FAS der AUDI AG trieb jeden Beteiligten dazu an, seine Ansätze und Algorithmen im Fahrzeug unter Beweis zu stellen. Auch die in dieser Dissertation erarbeiteten Methoden der Situationsanalyse können durch exemplarische Darstellungen in einem Realfahrzeug unter realen Bedingungen untermauert werden. Als Plattform für Implementationen standen hybride Rechnersysteme aus Standard-PCs mit Windows Betriebssystem und ADTF¹¹ sowie Autoboxen mit einer dSpace/MATLAB Umgebung zur Verfügung. Die Versuchsträger sind im Anhang A beschrieben.

⁹Vgl. Reichel u. a. (2010b), Bouzouraa u. a. (2010)

¹⁰AKTIV-AGB - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr; Teilprojekt Aktive Gefahrenbremsung, gefördert durch das BMWi

¹¹ADTF - Automotive Data and Time Triggered Framework, ein von der AUDI AG entwickeltes und zum Standard in der Automobilindustrie gereiftes Werkzeug für das Rapid Prototyping von FAS

1.5 Wissenschaftliche Zielsetzungen

Aus den Darstellungen des Standes der Technik im nachfolgenden Kapitel 2 ergeben sich für diese Arbeit drei wissenschaftliche Fragestellungen:

1. Welche Aufgaben hat die Situationsanalyse für FAS und wie können diese funktional strukturiert werden?
2. Was ist eine mögliche Methodik für die Situationsanalyse einer automatischen Gefahrenbremsung?
3. Was ist eine mögliche Methodik für die Erkennung einer Einfädelsituation im dichten Verkehr als Basis eines Komfortsystem-Assistenzsystems?

Während die in Kapitel 1.3 hergeleitete Definition der Situationsanalyse (SiA) für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme diese abstrakt beschreibt, ist das gesamte Aufgabenspektrum der SiA bislang noch nicht in ausreichender Tiefe dargestellt worden. In diesem Zusammenhang fehlt auch eine Beschreibung einer schlüssigen inneren Systemarchitektur, die dem aktuellen Stand der Technik Rechnung trägt¹² und die funktionalen Aufgaben sinnvoll miteinander verkettet. Diese Lücken adressieren die Ausführungen in Teil II.

Für eine Sicherheitsfunktion wie die aktive Gefahrenbremsung hat die Situationsanalyse die Aufgabe, die notwendigen Voraussetzungen für einen Eingriff abzuprüfen. Die herausforderndste dieser Prüfungen ist der Test auf die Unausweichlichkeit einer Situation; also das Nichtvorhandensein einer unfallfreien Ausweichtrajektorie. Die Arbeiten auf diesem Gebiet lassen bislang einen Ansatz vermissen, der in einem komplexen Umfeld, bestehend aus einer beliebig strukturierten statischen Umgebung und beliebig vielen dynamischen Objekten und unter Berücksichtigung des Fahrerzustandes, diese Unausweichlichkeit abschätzen kann.¹³ Die Komplexität ergibt sich zum einen aus der beliebigen Struktur der statischen Umgebung, die mittels beliebig geformter Belegtbereiche und nicht über Boxen repräsentiert wird, und zum anderen aus den permutierenden Kooperationsmöglichkeiten zwischen dem eigenen Fahrzeug¹⁴, den Objekten und der Umgebung. Die im Teil III beschriebene Methodik zeigt hierfür einen möglichen Lösungsweg.

Für Komfortfunktionen, wie eine automatische Längsregelung oder vollautomatisches Fahren im Stau, hat die SiA unter anderem die Aufgabe, bestimmte Situationen zu erkennen. Die Einfädelsituation im dichten Verkehr ist eine solche Situation. Hierbei muss das System das explizite Wissen über den Ort und die eigene Lage innerhalb der Einfädelsituation herausarbeiten. In der Literatur konnte hierzu kein wissenschaftlicher Beitrag gefunden werden. Einzig militärisch motivierte Forschungen beschäftigen sich mit der Frage nach möglichen Vereinigungsorten von aus der Luft detektierten Fahrzeugkolonnen. Aus diesem

¹²Vgl. Reichel u. a. (2010b); Bouzouraa u. a. (2010)

¹³Vgl. Reichel u. a. (2010b)

¹⁴Im Folgenden wird das Eigenfahrzeug auch als EGO bezeichnet.

Grund wird mit der in Teil III vorgestellten Methodik wissenschaftliches Neuland betreten.¹⁵ In diesem Zusammenhang wird die Klassifikationsmethode *Scenario Based Random Forest* von Botsch (2009) erstmals als Werkzeug der Situationsanalyse für fortschrittliche FAS vorgestellt.

1.6 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist aus Abbildung 1.6 ersichtlich. Der erste Teil widmet sich der Einbettung der Arbeit in die wissenschaftliche Forschungslandschaft. Anschließend werden in den drei Folgeteilen die vorliegenden wissenschaftlichen Lücken bearbeitet. Teil II beschäftigt sich mit der Aufgabenbeschreibung und der funktionalen Strukturierung der SiA. Die dazu erarbeiteten theoretischen Überlegungen fließen in die beiden folgenden Teile ein, die neuartige Methodiken für die SiA einer Sicherheits- und einer Komfortfunktion vorstellen. Teil III präsentiert eine Technik zur Bestimmung der Unausweichlichkeit einer Situation als Basis der Eingriffsentscheidung einer aktiven Gefahrenbremsung und Teil IV eine Technik zur Klassifikation einer Einfädelsituation im Stau. Im abschließenden Teil V werden die Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

1.7 Notation

In dieser Arbeit werden **Vektoren** und **Matrizen** fettgedruckt, wobei Vektoren kleinbuchstabig und Matrizen GROSSbuchstabig gesetzt werden. Zufallsvariablen zeichnen sich durch die Nutzung einer Sans Serif Schrift aus. Wichtige Textpassagen werden mittels *Kursivschrift* hervorgehoben.

¹⁵Vgl. Reichel u. a. (2010a)

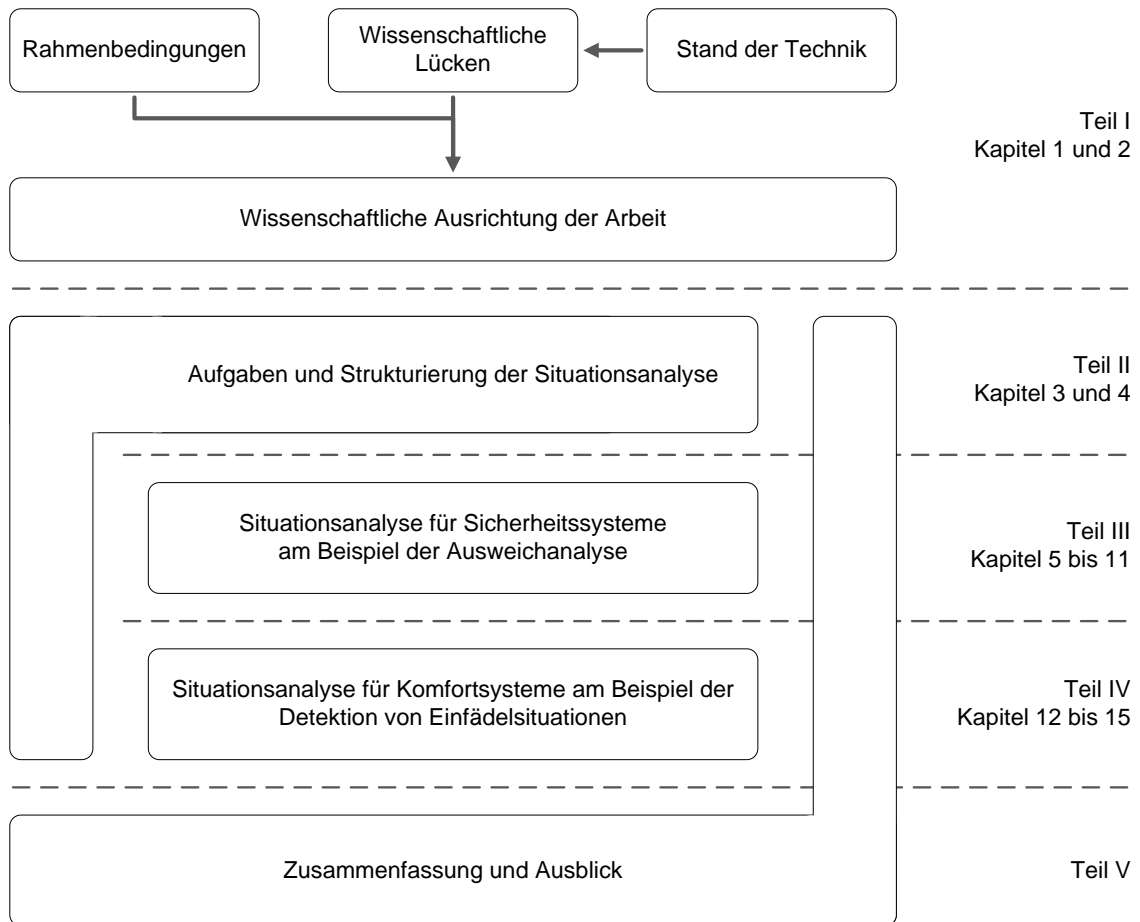


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Technik

Entsprechend der Schwerpunkte dieser Dissertation stehen bei der Ausarbeitung dieses Kapitels die Forschungsarbeiten im Mittelpunkt, die

- Beiträge zur Abgrenzung des Begriffes der Situationsanalyse und damit zur Bestimmung ihres Aufgabenspektrums,
- Beiträge zur Gefahreinschätzung einer Verkehrssituation aus Sicht des EGO als Basis einer automatisch eingreifenden Notbremse,
- sowie Beiträge zur Bestimmung der Existenz einer Einfädelsituation

geleistet haben. Hierbei werden im Wesentlichen nur Forschungsleistungen berücksichtigt, deren theoretische Ansätze auch erfolgreiche praktische Umsetzung gefunden haben. Des Weiteren werden nur Forschungs- und keine Serienstände dokumentiert, da letztere meist aus den Forschungsergebnissen resultieren. Außerdem wird an dieser Stelle konsequent auf Abbildungen verzichtet, da diese ggf. an anderen Stellen der Dissertation gezeigt und erläutert werden.

Dem umfangreichen Portfolio an Veröffentlichungen zum Thema der Situationsanalyse ist es geschuldet, dass sich die Darstellungen auf europäische Gruppen konzentrieren und nur bedeutende Beiträge aus weiteren Ländern einbezogen wurden. Datenbasis bilden sämtliche Bände des Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2002 bis FAS2011 sowie IEEE Veröffentlichungen der Jahre 2005 bis 2010 mit dem Fokus auf das Intelligent Vehicles Symposium (IV) und die Intelligent Transportation System Conference (ITSC). Des Weiteren wurden maßgebende Werke seit 1989 aus dem Umfeld von Prof. Dickmanns berücksichtigt. Als Strukturierungshilfe dient die Projektlandschaft, bestehend aus PROMETHEUS, PReVENT, AKTIV, INVENT, PRORETA, Kognitive Mobile und MobilSoft. Ergänzend werden die Forschungsergebnisse der Technischen Universitäten Braunschweig, Chemnitz und Darmstadt sowie die der Mercedes-Benz-Forschung analysiert. Anschließend konzentriert sich der Blick über den Tellerrand der europäischen Forschung hinaus auf die Finalteams der DARPA Urban Challenge sowie auf die militärische Forschung der USA.

Da keine der aufgeführten Forschungsgruppen bzw. -projekte das Thema der Erkennung einer Einfädelsituation in den Fokus nahm, wird der Stand der Technik für dieses Thema abschließend separat herausgearbeitet. Hierbei musste der Quellenpool um Veröffentlichungen aus der Konferenz SPIE erweitert werden, um zumindest auf annähernd ähnliche wissenschaftliche Fragestellungen zu stoßen.

2.1 Ausgewählte europäische Forschungsprojekte

Die Abbildung 2.1 bietet eine Übersicht zu den Forschungsprojekten, nach denen die Analyse des Standes der Technik auf den kommenden Seiten strukturiert ist. Den Anfang macht das weit zurückliegende Projekt PROMETHEUS. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass dort die Situationsanalyse für automatische Fahrzeuge grundlegend beschrieben wurde. Zudem stammt die Dissertation von Prof. Maurer aus dieser Zeit, der nunmehr als Professor der TU Braunschweig diese Dissertation betreut und dessen Gedankengut in diese Arbeit einfließt.

Auf den kommenden Seiten wird das jeweilige Projekt zunächst beschrieben, um im Anschluss auf die Stellung und das Verständnis der Situationsanalyse innerhalb des Projektes einzugehen. Des Weiteren sind die Arbeiten aufgeführt, die einen nennenswerten Beitrag für die Methodenentwicklung innerhalb der Situationsanalyse geliefert haben. Spezielles Augenmerk wird dabei auf die Arbeiten gerichtet, die die Entscheidungsgrundlage für automatische Bremsengriffe in Gefahrensituationen vorbereiten.

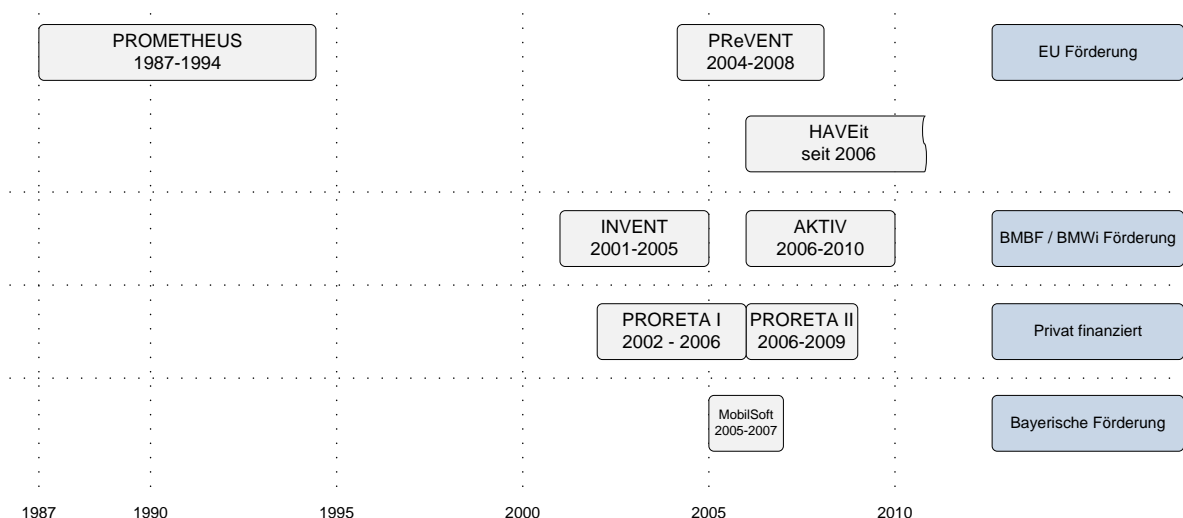


Abbildung 2.1: Übersicht der relevanten Forschungsprojekte

2.1.1 Prometheus

Das europäische Forschungsprojekt Prometheus¹⁶ war das bislang größte seiner Art zur Erforschung führerloser Fahrzeuge. Die Arbeiten an diesem Projekt legten die Grundlagen für die Präsentation einer größtenteils autonomen Fahrt von München nach Odense und zurück durch das Forscherteam um Professor Dickmanns von der Universität der

¹⁶Prometheus - PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety

Bundeswehr in München 1994 (vgl. Maurer u. a. (1996))¹⁷. Von den entstandenen wissenschaftlichen Publikationen sind vor allem die Arbeiten von Maurer (2000) für diese Dissertation wichtig, da er bei der Konzeption seines Systems der flexiblen Automatisierung von Kraftfahrzeugen mit Rechnersehen explizit davon ausgeht, dass FAS situationsgerecht entscheiden müssen, um akzeptiert zu werden:

Mit zunehmendem Grad der Automatisierung fällt die Maschine Entscheidungen, die heute noch vom Menschen getroffen werden. Die maschinellen Entscheidungen müssen der aktuellen Situation gerecht werden, um von Menschen als adäquat anerkannt zu werden. (Vgl. Maurer (2000), Seite 90)

In der von ihm entwickelten Systemarchitektur übernimmt die *Situationserfassung* die Aufgabe, relevante Aspekte der Situation zu analysieren und eine Beschreibung dieser zu generieren. Die Situationserfassung ist in den Darstellungen von Maurer eng verzahnt mit der Verhaltensentscheidung und deren Methodik, stellt die generierte Situationsbeschreibung doch deren Entscheidungsbasis dar. Ausführlich dargestellt werden die Situationserfassungen für die Aspekte *Überwachung der Leistungsfähigkeit* sowie die für die *Fortbewegung*. Zur Beurteilung der fahrzeugeigenen Leistungsfähigkeit schlägt Maurer die Überwachung von Hardwarekomponenten (z.B. Bremse, Lenkung, Sensorik), die Kontrolle der Kommunikation der einzelnen Softwaremodule (z.B. Zykluszeiten) sowie eine Bewertung des gesamten Regelkreises (z.B. Quadrat der Abweichung von Soll- und Istwerten) vor. Die Situationserfassung zur Fortbewegung hat zur Aufgabe, die Bedeutung von relevanten Objekten für die Fortbewegung zu ermitteln. Als Relevanzmaße dienen Abstands- und Zeitmaße sowie davon abgeleitete Größen. Für die Methoden der Situationserfassung verweist er bis auf die Darstellung von Qualitätsmaßen größtenteils auf weitere Arbeiten.

Aus dem gleichen Forschungsteam befasst sich Pellkofer (2003) intensiv mit der Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge und im Zuge dessen auch mit der Situationsanalyse. Auch er teilt die Situation in einzelne Aspekte auf, um kontextabhängig eine Analyse von Teilsituationen durchzuführen. Die Gesamtheit der einzelnen Beschreibungen der Aspekte stellt für ihn die Gesamtsituation dar. Er nutzt Fuzzi-Logik für die Abbildung von Eingangsgrößen auf unscharfe Mengen, die Ausprägungen verschiedener Situationsaspekte darstellen (z.B. beim Aspekt *Relativlage zum Fahrschlauch und Eigenfahrzeug* die Ausprägungen *Im Fahrschlauch, links/rechts neben dem Fahrschlauch...*¹⁸). Grundlage dieser Vorgehensweise ist seine Auffassung eines Situationsaspektes als linguistische Variable, wie sie von Luth und Wendt (1998) definiert wird.

¹⁷Die Fahrt war nicht mehr Teil des Prometheus Projektes.

¹⁸Vgl. Pellkofer (2003), Seite 126

2.1.2 PReVENT Projekt

Das von der Europäischen Kommission geförderte Projekt PReVENT adressierte in den Jahren 2005 bis 2008 präventive Maßnahmen zur Unfallvermeidung, die mittels fortschrittlicher FAS umgesetzt werden können. In den Projektdarstellungen von Fuchs (2005) bzw. Park u. a. (2006) wird der Situationsanalyse als solcher unter dem Namen *Situation Refinement* als Teil der Wahrnehmung Bedeutung eingeräumt. Detaillierter geht Tatschke u. a. (2006) auf diesen Begriff ein, der darunter die Zuordnung von Objekten zu Fahrstreifen sowie die Bestimmung zukünftiger Manöver des EGO und der anderen Objekte versteht. Die somit erhaltene Beschreibung auf dem „Situation Level“ bezeichnet er als „Environment Description“.¹⁹ In einer der aktuellsten Publikationen aus dem PReVENT-Projekt präsentiert Pietzsch u. a. (2009) eine Systemarchitektur, die den Begriff der Situationsanalyse namentlich aufführt und ihn klar von der Wahrnehmung abgrenzt. Die Situationsanalyse hat hierbei die Aufgabe der Bestimmung einer Time To Collision (TTC) zum relevanten Zielobjekt. Interessant ist die Darstellung von Schulze u. a. (2006) auf Seite 15 seiner Präsentation. Dort propagiert er eine gemeinsame Wahrnehmung als Basis aller FAS statt einer Menge verschiedener Autisten. Auf Basis einer gemeinsamen Umfeldbeschreibung kommen die einzelnen FAS zu individuellen Eingriffsentscheidungen. Im dritten Teil seiner Aufteilung in „Perception, Decision, Action“ findet eine Arbitrierung der einzelnen Eingriffswünsche statt.

Am detailliertesten wird der Umfang der gemeinsamen Umfeldbeschreibung von Tatschke u. a. (2006) dargestellt. Diese umfasst Daten über das EGO, den Fahrer, den Straßenverlauf und dynamische Objekte. Obwohl im PReVENT-Projekt bereits gitterbasierte Sensordatenfusionsmethoden benutzt werden und somit auch Beschreibungen des Freiraums und des statischen Umfeldes existierten, werden diese nicht verwendet. Deutlich wird dies bei Pietzsch u. a. (2009), die zwei Ansätze einer Belegungskarte für die Funktion einer Kollisionswarnung vergleichen, allerdings nur, um aus den Belegungsgittern dynamische Objekte zu segmentieren und bei geringer TTC eine Warnung auszulösen.

Eine interessante Methodik in der Situationsanalyse führt Meitinger (2009) ein. In seiner Dissertation beschäftigt er sich u.a. mit der Entwicklung einer Linksabbiegeassistentz, die in gefährlichen Situationen das Abbiegen verzögert bzw. ein Anfahren unterdrückt. Aus der Gefahrenbeurteilung anhand einer Referenzkreuzung möchte er hierbei auf das Risiko an anderen, beliebig strukturierten Kreuzungen schließen können. Hierzu greift er auf Morphing-Algorithmen zurück, wie sie aus der Bildverarbeitung bekannt sind. Aus den Kreuzungsgeometrien bestimmt er die Morphingparameter, über die auch die Zustände der dynamischen Objekte in die Referenzkreuzung abgebildet werden. Leider macht Meitinger (2009) keine Aussagen zur Qualität seiner Methodik.

¹⁹Vgl. Tatschke u. a. (2006), Seite 10, Abb. 7

2.1.3 HAVEit

Das europäisch geförderte Projekt HAVEit²⁰ hat zum Ziel, eine skalierbare Fahrerassistenz zu entwickeln, bei der sich der Umfang der Assistenz an den Bedürfnissen des Fahrers ausrichtet. Hoeger (2009b) stellt in seiner Projektpräsentation die Entwicklung einer sicheren Fahrzeugarchitektur mit Unterstützung von X-By-Wire-Funktionalitäten als einen Forschungsschwerpunkt vor. In seinen Ausführungen, wie auch in dem Deliverable D12.1, das sich auf 60 Seiten ausschließlich mit der Architektur des Fahrerassistenzsystems beschäftigt, findet eine *Situationsanalyse* an keiner Stelle Erwähnung.²¹ Zwar ist eine funktionale Systemarchitektur als Schaubild auf Seite 11 gegeben, hierbei kann allerdings eine *Situationsanalyse* auch nicht unter einem anderen Namen gelesen werden. Dies ist verwunderlich, da es sich bei dem im Februar 2008 gestarteten Projekt um eines der aktuellsten handelt.

Der einzige Verweis auf eine Situationsanalyse innerhalb des HAVEit-Projektes findet sich bei Rauch u. a. (2009). Für ihn bestimmt die Situationsanalyse die Gefährlichkeit einer Situation, um daraus den notwendigen Assistenzgrad abzuleiten:

Together with a situation assessment that estimates the objective task demands, the general safety-criticality of a situation and the need for automation can be estimated. (Vgl. Rauch u. a. (2009), Seite 2)

2.1.4 INVENT

Das Projekt INVENT²² war eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsinitiative deutscher Unternehmen, um Lösungen zu erarbeiten, die den Verkehr der Zukunft sicherer und effizienter machen. Schwerpunkte des von 2001 bis 2005 laufenden Projektes waren die Fahrerassistenz sowie die aktive Sicherheit. Als grundlegende Struktur eines FAS präsentiert das INVENT-Konsortium (2001) eine dreistufige Architektur bestehend aus

Situationserfassung Erkennen von Verkehrsteilnehmern, Verkehrszustand, Infrastruktur, Verkehrszeichen, Fahrzeugzustand, Fahrerabsicht

Situationsanalyse und Aktionsentscheidung Informationsvernetzung und -auswertung, Aktionsentscheidung und -planung unter Berücksichtigung der Handlungsoptionen

Aktionsausführung Schnittstellen zum Fahrer mit optischer, akustischer und haptischer Information und Warnung sowie zum Fahrzeug mit aktivem Eingriff in Bremse, Motormanagement und gegebenenfalls Lenkung

²⁰HAVEit - Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport

²¹Vgl. Hoeger (2009a)

²²INVENT - INtelligenter VERkehr und Nutzergerechte Technik

Dem Inhalt nach wird in der heutigen Literatur für die Situationserfassung eher der Begriff *Wahrnehmung* oder *Perception* verwendet. Des Weiteren ist die Kombination von Situationsanalyse und Aktionsentscheidung als gemeinsamer Punkt interessant, spiegelt er doch die Abhängigkeit der Situationsanalyse vom jeweiligen Aktionsspektrum der Assistenzfunktion wider.

Im Rahmen des Subprojektes *Stauassistent* beschäftigte sich Sandkühler (2008) mit einer automatisierten und situationsspezifischen Längsführung.²³ Hierbei zeichnete er in einem Fahrversuch auf der Autobahn zunächst verbale Einschätzungen zum Verkehrsgeschehen von Probanden auf. Diese sollten während der Fahrt die Situation beschreiben und angeben, wovon sie diese Einschätzung ableiten (z.B. Situation Anfahren - Geschwindigkeitszunahme aus dem Stillstand). Als Ergebnis leitete er eine geeignete Anzahl an Situationsklassen sowie deren Merkmale und Merkmalsausprägungen ab. Für die Online-Klassifikation selbst nutzt er einen einfachen Quader-Klassifikator.²⁴ Als Ergebnis präsentiert Sandkühler (2008) eine Realfahrt im Stau, bestehend aus der Situationsfolge *Stillstand - Anfahren - Folgen - Anhalten - Stillstand*. Der Algorithmus erkannte zwar die einzelnen Elemente, allerdings wechselte er oft zu spät die Situationsklasse. Der Autor macht für dieses Verhalten die begrenzte Wahrnehmung verantwortlich. So ging der Fahrer bereits dazu über anzuhalten, wenn die Fahrzeugkolonne weit vor ihm zum Stehen kam. Das Fahrzeug selbst konnte aber nur auf Daten des unmittelbaren Vorderfahrzeuges zurückgreifen.

Von Meitinger (2009) wurde im Rahmen von INVENT eine Stopschildassistentz entwickelt, die dem unabsichtlichen Überfahren von Stopschildern entgegenwirken soll. Mit Hilfe der Daten über das Anfahrverhalten und die Position des Stopschildes führte der Autor eine Situationsanalyse durch.²⁵ In diesem Zusammenhang verglich er verschiedene Klassifikationsmethoden. Neben der „analytischen Lösung“ (einfacher Quaderklassifikator) nutzte er verschieden parametrisierte Fuzzy-Logiken und ein neuronales Netz. Obwohl der Autor feststellt, dass die neuronalen Netze ein erhebliches Potential besitzen, Falschklassifikationen zu reduzieren, greift er für seine weitergehenden Untersuchungen auf den einfachen, analytischen Ansatz zurück.

2.1.5 AKTIV

Das auf nationaler Ebene geförderte Projekt AKTIV²⁶ stellt das Folgeprojekt zu INVENT dar und hat ebenfalls zum Ziel, den Verkehr der Zukunft sicherer und flüssiger zu gestalten.

²³Vgl. auch Sandkühler und Benmimoun (2004)

²⁴Bei einem Quader-Klassifikator wird die Zugehörigkeit zu einer Klasse durch Intervalle angegeben. Je nach Dimension des Merkmalsraums werden die Klassen somit als Strecken, Rechtecke oder Quader abgebildet.

²⁵Meitinger wirkte bei zwei Projekten mit, daher wird ein weiterer Teil der Arbeit im Rahmen des Projektes PREVENT in Kapitel 2.1.2 besprochen.

²⁶AKTIV - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr, gefördert vom BMWi

ten. Eines der Fokusthemen ist die Entwicklung einer aktiven Gefahrenbremsung (AGB), in dessen Rahmen auch ein Teil dieser Dissertation entstanden ist. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse anderer Forschungsgruppen sind leider nicht vollständig, da nur wenige Ergebnisse wissenschaftlich publiziert wurden.

Im Rahmen der Abschlusspräsentation gliedert Branz (2010) von der Robert Bosch GmbH die *Situationsanalyse* in eine Situationszuordnung und eine Situationsprädiktion. Bei der Zuordnung handelt es sich um die Detektion vorher festgelegter Situationen. In diesem Zusammenhang spricht er auch von einem Situationskatalog. Die Prädiktion der Situation dient schlussendlich der Gefährdungsberechnung für die aktive Gefahrenbremsung. Leider sind keine weiteren Veröffentlichungen der Robert Bosch GmbH zu diesem Thema bekannt.

Nitz (2010) beschreibt in seiner Dissertation die prototypische Entwicklung einer AGB auf Basis eines Lidarscanners.²⁷ Obwohl die eingesetzte Sensorik eine gitterbasierte Wahrnehmung ermöglichen würde, ist diese Methodik nicht Gegenstand seiner Forschung. Vielmehr liegt der Fokus der Arbeit auf einer objektbasierten Situationsanalyse für eine AGB, auch wenn er diese nicht explizit als solche in der funktionalen Architektur ausweist. Interessant ist der gezeigte Ansatz zur Gefährdungsberechnung: Zunächst wird das relevante Objekt über eine klassische TTC Berechnung ausgewählt. Dann wird nicht nur das Kollisionsrisiko, sondern auch das Risiko eines Ausweichmanövers geschätzt. Hierbei gehen alle bekannten dynamischen als auch statischen Objekte ein. Die Berechnung erfolgt mittels probabilistischer Methoden, wobei die Merkmale zuerst mittels Fuzzylogik auf unscharfe Zugehörigkeitsmengen abgebildet und anschließend zur weiteren Berechnung in ein Bayesisches Netz gespeist werden.²⁸ Funktional setzt der Autor auf die Anpassung der Verzögerung in Abhängigkeit des Ausweichrisikos. Als Ergebnisse präsentiert er Simulationen und Realfahrten auf dynamische sowie stehende Einzelziele ohne Betrachtung ausweichbegrenzender Objekte, in denen der Versuchsträger größtenteils unfallvermeidend reagierte. Als Beiprodukt der simulativen Betrachtungen weist Nitz (2010) darauf hin, dass eine automatisierte Vollbremsung vermutlich nicht kolonnenstabil ist. In der entsprechenden Verkehrssimulation hatte dies zwar keinen unmittelbaren Einfluss auf das ausgerüstete Fahrzeug, führte aber in der Folge zu Auffahrunfällen.

Reinisch u. a. (2010) führen die Arbeiten von Nitz (2010) fort und untersuchen die Einbeziehung eines Reaktionszeitmodells in die Situationsanalyse. Hierdurch versprechen sich die Autoren, das Eingriffsdilemma²⁹ einer AGB entspannen zu können. Sie prädictieren die Situation um den Zeitraum in die Zukunft, die ein Fahrer braucht, um die Situation wahrzunehmen, sich zu orientieren, zu entscheiden und diese Entscheidung umzusetzen. Eine zunehmend gefährlicher werdende Situation kann hiermit frühzeitig erkannt wer-

²⁷Vgl. auch Nitz und Zahn (2008)

²⁸Vgl. Nitz (2010), Seite 57ff

²⁹Das Eingriffsdilemma beschreibt den Zielkonflikt einer automatischen Notbremsung: Soll der Fahrer nicht bevormundet werden, so greift das System erst ein, wenn eine Notbremsung unvermeidbar ist. Dies reicht allerdings nur bei niedrigen Geschwindigkeiten aus, um unfallvermeidend zu agieren.

den. Die Modellierung der Reaktionszeit lehnt sich an das von Ullman (2006) vorgestellte *observe-orient-decide-act model* (OODA-loop) an. Mit dieser Methodik verfolgen die Autoren Reinisch u. a. (2010) eine ähnliche Strategie, wie sie in dieser Dissertation bei der in Abschnitt 6.5 vorgestellten Berücksichtigung einer Reaktionszeit verfolgt wird.

2.1.6 PRORETA I und II

Die beiden Forschungsprojekte PRORETA I und II, jeweils Kooperationsarbeiten der TU Darmstadt und der Continental AG, adressieren die Unfallvermeidung im Straßenverkehr mit Hilfe von automatisch eingreifenden, fortschrittlichen FAS. Während im ersten Projekt drohende Gefahren durch stehende oder einscherende Hindernisse bearbeitet wurden, konzentrierten sich die Forschungsarbeiten in PRORETA II auf Gegenverkehrsszenarien.

In PRORETA I wurde noch nicht explizit von der Situationsanalyse als funktionalem Element der Systemarchitektur gesprochen. So stellt Darms (2007) in seiner Dissertation eine Systemarchitektur vor, konzentriert sich allerdings auf die Fragestellungen innerhalb der Wahrnehmung. Unter dem Punkt *Anwendungsebene* werden von ihm die Elemente Situationsanalyse, Verhaltensentscheidung und Regler subsummiert.³⁰

Auch ohne die Bezeichnung *Situationsanalyse* direkt zu verwenden, entsprechen die Arbeiten von Stählin (2008) zur Eingriffsentscheidung für das Sicherheits-FAS von PRORETA I dem Verständnis der Situationsanalyse, wie es in Kapitel 1.3 definiert wurde. In seiner Dissertation³¹ widmet er sich im Wesentlichen der Vorbereitung dieser Eingriffsentscheidung. Auf der Basis von Daten zur Eigenbewegung klassifiziert er zunächst das aktuell vom Fahrer durchgeführte Längs- bzw. Quermanöver.³² Mit diesen Daten und den Informationen über den Fahrstreifenverlauf und dynamische Objekte prädiziert er die Trajektorien der relevanten Objekte. Hierzu nutzt er den von ihm entwickelten MAPP³³ Algorithmus. Als Ergebnis dieser manöverspezifischen Prädiktion gibt Stählin (2008) an, dass bei einer Prädiktionszeit von 3s knapp 50% der Positionsfehler unterhalb von 1m liegen. Ein rein kinematischer Ansatz kommt auf unter 35%. Diese Fehlersenkung ist positiv, aber für ein sicherheitsrelevantes System m.E. noch viel zu hoch. Die Eingriffsentscheidung selbst trifft Stählin auf der Basis einfacher Regeln³⁴ unter Nutzung von Abstands- und Zeitmaßen.

Die Veröffentlichungen von Isermann u. a. (2010) sowie von Schmitt u. a. (2010) zum Folgeprojekt PRORETA II greifen bereits im Titel das Wort *Situationsanalyse* auf. In einer sehr groben funktionalen Systemübersicht stellen sie diese zwischen die Module

³⁰Vgl. Darms (2007), Seite 63, Abb. 5.1

³¹Vgl. auch Stählin u. a. (2006); Isermann u. a. (2009, 2008a,b)

³²Längs: Bremsen, Konst. Geschwindigkeit, Beschleunigen; Quer: Geradeaus, Kurve, Spurwechsel; Vgl. Stählin, Seite 49ff

³³MAneuver-based Path Prediction, Vgl. Stählin (2008), Seite 56ff, Kap. 6

³⁴Vgl. Stählin (2008), Seite 106, Abb. 8.12

„Sensorfusion“ und „Warning/Actions“³⁵ und definieren deren Aufgabe:

The situation analysis has the task to detect dangerous overtaking maneuvers.
(Vgl. Isermann u. a. (2010), Seite 6)

Als Konsequenz muss das System zunächst bestimmen, ob sich das Fahrzeug in einem Überholvorgang befindet. Anschließend wird die Kritikalität dieses Vorganges abgeschätzt. Methodisch greifen Schmitt u. a. (2010) auf die im PRORETA I Projekt bereits bewährte Klassifikationsmethodik zurück: Der zu bestimmende Überholvorgang wird durch einen Zustandsautomaten in Teilmanöver gegliedert, deren Transitionen mittels geeigneter Merkmale geschaltet werden. Die Kritikalität wird ebenfalls durch die TTC charakterisiert. Eine Probandenstudie zur Bestimmung der Adequate Overtaking Margin (AOM) von Hohm (2010) parametrisiert deren Einsatz.

2.1.7 Sonderforschungsbereich/Transregio 28: Kognitive Automobile

Mit der Zielsetzung einer systematischen und interdisziplinären Erforschung der maschinellen Kognition mobiler Systeme als Grundlage maschinellen Handelns arbeiteten zwischen 2006 und 2010 mehr als 60 Wissenschaftler im DFG geförderten Sonderforschungsbereich (SFB) Kognitive Automobile an der Erforschung von Theorien zur maschinellen Kognition und deren prototypischer Demonstration.³⁶ Die zu entwickelnden Fahrzeuge sollen hierbei über „die Erfassung einzelner Kenngrößen hinaus die jeweilige Situation ganzheitlich erfassen und deren Bedeutung für das eigene Automobil interpretieren [können], um ein angemessenes Verhalten zu generieren“.³⁷ Eine gute Übersicht bezüglich der zahlreichen Aktivitäten geben Thuy u. a. (2008). Im Folgenden wurden aus den über 100 Publikationen die herausgegriffen, die sich mit der Darstellung der Systemarchitektur auseinandersetzen oder Methoden beschreiben, die in der Situationsanalyse angewendet werden können.³⁸ Somit konzentrieren sich die Ausführungen zunächst auf die Arbeiten um Professor Stiller vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und im Anschluss auf die Forschungsergebnisse der Teams um Professor Dillmann vom KIT sowie um Professor Buss der TU München.

Die detaillierteste Darstellung der funktionalen Systemarchitektur findet sich bei Stiller u. a. (2008a). Im Rahmen eines Überblicksartikels zu probabilistischen Methodiken in der Umfeldwahrnehmung kognitiver Automobile unterteilen sie die Systemstruktur in vier

³⁵Vgl. Isermann u. a. (2010), Seite 6, Abb. 10

³⁶Der SFB/TR Kognitive Automobile vernetzt Wissenschaftler des Karlsruher Instituts für Technologie, des Fraunhofer IITB in Karlsruhe sowie der Technischen Universität und der Universität der Bundeswehr in München.

³⁷Vgl. Stiller und Gayko (2008), Seite 551

³⁸Für eine Übersicht der Publikationen Vgl. <http://www.kognimobil.org/index.php?selection=4>

Ebenen: *physische Ebene, systemdynamische Ebene, Situationsanalyse und Verhaltensentscheidung* sowie *Wissensrepräsentation*. In der Ebene *Situationsanalyse und Verhaltensentscheidung* sprechen die Autoren von einer *Situationsinterpretation* und beschreiben den dadurch generierten Informationsumfang:

Die so entstehende Wissensrepräsentation umfasst neben metrischer Information auch durch Schlussfolgern gewonnene begriffliche Information, wie z.B. „Das Fahrzeug rechts vor mir möchte auf meine Spur einscheren.“ (Vgl. Stiller u. a. (2008a), Seite 567)

Eine weitere Erläuterung der Architektur geben die Autoren nicht. In anderen Abbildungen zur funktionalen Systemarchitektur, wie sie in Goebel u. a. (2008a) oder Thuy u. a. (2008) gezeigt werden, bildet die Situationsanalyse das Bindeglied zwischen den Modulen der Wahrnehmung (Object Fusion, Communication Manager, Position Interface) und der Verhaltensentscheidung (Behaviour Decision). Zu Aufgabe oder Ausgestaltung der Situationsanalyse werden in den Veröffentlichungen keine expliziten Angaben gemacht. Vielmehr verstecken sich diese Erläuterungen zwischen den Zeilen. So beschreiben Thuy u. a. die Repräsentation der Eingangsinformation:

Basierend auf den Objekteigenschaften, wie Lage- und Formmodell sowie der Objekt- oder Straßenposition und ihren prädizierten Trajektorien, wird zunächst ein Szenenbaum aufgebaut. Dieser dient zur Situationsanalyse und speichert die relative Lage der erkannten Objekte zueinander. (Vgl. Thuy u. a. (2008), Seite 7)

Goebel u. a. (2008b) geben als Beispiele für die Ausgangsdaten „Höherer Wahrnehmungsebenen“ ein bewertetes Fahrzeugumfeld, die analysierte Situation oder die eigene Verhaltensentscheidung an. Im weiteren Verlauf seiner Ausführungen konzentriert sich Goedel auf das von ihm entwickelte Software-Framework KogMo-RTDB³⁹, das in den autonomen Fahrzeugen aus München (MUCCI, MuCAR-3) und Karlsruhe (AnnieWAY) verwendet wird. In weiteren Publikationen anderer Autoren taucht der Begriff der Situationsanalyse zwar im Text auf, wird aber weder in entsprechenden Darstellungen zu Architekturen verwendet noch genau definiert oder erläutert.⁴⁰

Aus dem Team um Professor Stiller sind die Arbeiten von Lulcheva u. a. (2008)⁴¹ relevant, denn sie haben den Anspruch, dass die entwickelten Methoden zur probabilistischen Inferenz sowohl auf Problemstellungen innerhalb der Wahrnehmung angewendet werden können, als auch für den Einsatz in der Situationsanalyse geeignet sind. Die von ihnen vorgestellten Forschungsaktivitäten fokussieren sich auf den Einsatz von Markov-Logiknetzen (MLN) für die Klassifikation von Objekten (Fußgänger, Fahrzeug, Infrastruktur. . .). Diese haben laut den Autoren den Vorteil, dass a-priori Wissen leicht mit Hilfe begrifflicher

³⁹Real-Time Database for Cognitive Automobiles, Vgl. Goebel und Färber (2007)

⁴⁰Vgl. Kammel u. a. (2008); Gindele u. a. (2008); Stiller u. a. (2008b)

⁴¹Vgl. auch Stiller und Lulcheva (2008); Stiller u. a. (2008a); Hummel u. a. (2008, 2007)

Formalismen eingebracht werden kann, wie zum Beispiel „Ein Fahrzeug befindet sich auf dem Boden“. Des Weiteren können Unsicherheiten der logischen Aussagen modelliert werden, wobei das System die konkreten Werte hierfür erlernt. Nach dem Aufbau des belegten Markov-Netzes ist es damit möglich, bei gegebenen Sensordaten durch Inferenz auf die Objektklasse und deren Wahrscheinlichkeit zu schließen. Die Klassifikationsergebnisse werden von Lulcheva u. a. (2008) als gut bewertet und anhand einzelner, ermutigender Beispiele dargestellt. Allerdings ist die Verarbeitungszeit von 25,31 Sekunden pro klassifizierter Szene ernüchternd.

Hummel (2009) stellt in ihrer Dissertation eine Methode der Wissensrepräsentation vor, die deskriptive Logik in Kombination mit Regeln nutzt.⁴² Sie hat das Ziel, die komplexen Zusammenhänge einer städtischen Kreuzung abzubilden und zu verstehen. Hierbei definiert sie *Intersection Understanding* als

the subtask of interpreting an image of a road intersection that enables (at least) the generation of a human-readable, qualitative scene description and an autonomous navigation through the intersection according to traffic rules.
(Vgl. Hummel u. a. (2008) Seite 1)

In einem ausführlich dargestellten Experiment zeigt die Autorin, wie das aufgebaute Wissen über eine real existierende, städtische, komplexe Kreuzung gezielt hochsprachlich abgefragt werden kann (z.B. „Auf welchem Fahrstreifen befindet sich das EGO?“). Des Weiteren wird dargestellt, wie Inkonsistenzen in den Sensordaten bzw. in der Wissensrepräsentation durch deduktives Schlussfolgern aufgedeckt werden können. Die Berechnungen erfolgten offline auf der Basis von simulierten Merkmalen aus Videobildern, Daten aus einer topologischen Karte und dem in RONNY⁴³ hinterlegten a-priori Wissen. Gerade diese für Menschen leicht verständliche Art der Modellierung von Wissen in komplexen Szenen lässt die Arbeiten von Hummel (2009) hoffnungsvoll für den Einsatz in der Situationsanalyse erscheinen. Allerdings weist sie darauf hin, dass Methoden der reinen deduktiven Inferenz nicht ausreichen. Vielmehr müssen diese um hypothetische Schlussfolgerungen erweitert werden, um auf die gegebenen Unsicherheiten der Wahrnehmung eingehen zu können. Ob der Einsatz auch in Echtzeit erfolgen könnte, ist aus keiner der Veröffentlichungen zu entnehmen.

Die Forschungsgruppe um Prof. Dillmann am Institut für Anthropomatik des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) beschäftigt sich im Rahmen des SFB mit der Situationsinterpretation und der Verhaltensplanung für autonome Fahrzeuge. Der noch junge Begriff der Anthropomatik wurde vor rund zehn Jahren von Karlsruher Informatikprofessoren geprägt und bezeichnet das Forschungsgebiet, das sich der Erforschung und Entwicklung menschengerechter Systeme mit Mitteln der Informatik widmet. Der Betrachtungswinkel ist menschenzentriert und es bedarf nach Ansicht der Namensgeber eines grundlegenden Verständnisses und der Modellierung des Menschen bezüglich seiner Anatomie, seiner

⁴²Vgl. auch Hummel u. a. (2008, 2007)

⁴³RONNY - Road Network Ontology, Vgl. Hummel (2009), Seite 73ff

Motorik, seiner Wahrnehmung, seiner Informationsverarbeitung sowie seines Verhaltens. Eines der Kernthemen ist das Lernen, Erkennen und Verstehen von Situationen. In diesem Zusammenhang präsentieren Vacek u. a. (2007a,b) den Einsatz der *case-based reasoning* (CBR) Technik für die Situationsanalyse und die Verhaltensentscheidung. Die Autoren sprechen direkt von der Situationsanalyse und machen deutlich, dass eine solche auch eine Abschätzung der Rückwirkungen des eigenen Handelns beinhaltet:

In order to select the appropriate behavior for an autonomous vehicle, an analysis of the situation is needed. The analysis consists of an estimation of the situation's development with respect to the selected behavior. (Vgl. Vacek u. a. (2007b), Seite 4271)

Die Abschätzung möglicher Folgesituationen ist mit Hilfe des CBR einfach möglich. Zunächst wird versucht, aus einem Pool von bekannten Situationen (cases) die aktuelle wiederzuerkennen. Danach kann die Verhaltensentscheidung ausgewählt werden, die erfahrungsgemäß zum gewünschten Erfolg führt. Die cases sind hierbei zeitlich verknüpft, sodass mit dem Wissen um die aktuelle Situation auch die Situationen bekannt sind, die durch die Anwendung eines bestimmten Verhaltens potentiell erreicht werden. Zudem sind die cases hierarchisch organisiert, wobei niedrigere Ordnungen Spezialisierungen darstellen (z.B. Rechtsabbiegen - Rechtsabbiegen mit Fahrradfahrer auf dem eigenen Fahrstreifen). Dies erleichtert das Verständnis und die automatisierte Situationserkennung. Leider präsentieren die Autoren keine weitergehenden Forschungsergebnisse oder die Anwendung in einem fahrenden System, was die Beurteilung der Leistungsfähigkeit dieser Methodik schwer möglich macht.

Aus der Gruppe um Professor Dillmann beschäftigen sich ferner Gindele u. a. (2010) mit der Erkennung von Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern als Grundlage einer verhaltensspezifischen Prädiktion deren Trajektorien. Sie nutzen ein dynamic bayesian network (DBN) und modellieren beispielhaft eine Autobahnfahrt mit den Zuständen Freifahrt, Folgen, Ausscheren, Überholen, Einscheren und Beschleunigen. Neben Daten über die beteiligten dynamischen Objekte stehen ihnen auch Informationen über den Fahrstreifenverlauf zur Verfügung. Prototypisch demonstrieren sie die Funktionsweise anhand einer einfachen Simulation eines Überholvorganges, wobei sie die Auswirkungen verrauschter Wahrnehmungsdaten aufzeigen. Qualitativ scheinen die Ergebnisse der Methodik bei zunehmendem Rauschen ebenfalls schlechter zu werden, wenn auch nicht im selben Maße. Leider geben die Autoren nur einen Durchschnittswert für die vom System ausgegebene Wahrscheinlichkeit der jeweils richtigen Verhaltensweise an, was keinen Rückschluss auf die Erkennungsrate liefert. Des Weiteren sprechen sie von einer Interaktionsbeachtung zwischen den Verkehrsteilnehmern, was allerdings in den gezeigten Szenarien nicht über die Interaktion zwischen EGO und dem Vorderfahrzeug hinausgeht.

Im Rahmen der Urban Challenge zeichnen Gindele u. a. (2008) für die Situationsanalyse und die Verhaltensentscheidung des Fahrzeuges AnnieWAY verantwortlich. Im Gegensatz zu den gezeigten wissenschaftlichen Arbeiten des SFB wurde in diesem Wettbewerb

ganz auf robuste und bekannte sowie leicht umsetzbare Methoden zurückgegriffen.⁴⁴ Die zu erwartenden Situationen wurden mit Hilfe eines hierarchischen Zustandsautomaten modelliert und die Situationsanalyse konzentrierte sich auf die Beurteilung von Fahrstreifenblockaden, die Detektion gefährlicher Objekte etc.

Der Fragestellung der Sicherheitsbewertung von autonom fahrenden Fahrzeugen mittels Erreichbarkeitsanalyse widmet sich Althoff (2010) an der TU München in seiner Dissertation sowie in seinem beachtenswert umfangreichen Portfolio an Publikationen.⁴⁵ Ausgehend von seinen Arbeiten im Bereich der klassischen Erreichbarkeitsanalyse, die darauf abzielen, aus einer gegebenen Menge an Anfangszuständen eines dynamischen Systems und Parametern die exakten, erreichbaren Endzustände zu ermitteln, widmet er sich der stochastischen Erreichbarkeitsanalyse. Diese dient der Abschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine unsichere Menge - hierbei bestehend aus Positionen und Geschwindigkeiten von Fahrzeugen - erreicht werden wird. Die Mächtigkeit seiner auf Markov-Ketten basierenden Techniken zeigt Althoff (2010) beispielhaft anhand verschiedener Simulationen von Kreuzungsszenen.⁴⁶ Des Weiteren präsentiert er die Ergebnisse einer online erfolgenden Sicherheitsbewertung des autonom agierenden Fahrzeuges MUCCI, das auf dem Testgelände der Universität der Bundeswehr in Neubiberg auf freier Fläche Fahrzeugen folgt. Die Realszenarien bestanden durchweg aus unkritischen Manövern. Ausgangspunkt seiner Berechnungen sind die geplante Trajektorie des Fahrzeuges, die Geometrie des betrachteten Straßenabschnittes, die Positionen und Geometrien statischer Hindernisse sowie die Positionen, Geschwindigkeiten und Klassifizierungen von dynamischen Verkehrsteilnehmern. Die Ergebnisse stimmen optimistisch, auch wenn die Verarbeitungszeiten von 100 bis 150ms⁴⁷ für ein Sicherheitssystem noch nicht echtzeitfähig sind. Die Visualisierungen des wahrscheinlichen zukünftigen Geschehens in einer Draufsicht sind für den Menschen gut interpretierbar. Um die ermittelten Werte der Unfallwahrscheinlichkeit zu referenzieren, nutzt Althoff die Ergebnisse aus Berechnungen mittels der Monte Carlo Methode. In der Diskussion der teilweise stark abweichenden Resultate kommt er unter anderem zu dem Schluss, dass auf Markov-Ketten basierte Methoden

- die Interaktion zwischen Fahrzeugen schwer abbilden können,
- im unstrukturierten Gelände vergleichsweise unflexibel sind und
- in Fällen, in denen es nicht nur eine plausible Trajektorie gibt, mit Monte Carlo Methoden kombiniert werden sollten.

Für eine Ausweichanalyse zur Entscheidungsvorbereitung einer automatischen Notbremsung, wie sie im Teil III dieser Arbeit vorgestellt wird, rät er zur Nutzung der Monte Carlo Methode, warnt allerdings gleichzeitig davor, diese in 2D Szenarien anzuwenden.

⁴⁴Vgl. Stiller u. a. (2008a), Seite 573

⁴⁵Für eine Übersicht siehe Althoff (2010), Seite 201ff

⁴⁶Vgl. Althoff (2010), Seite 146ff und Seite 159ff sowie Althoff u. a. (2009, 2008a,b,c,d)

⁴⁷Basierend auf der Nutzung eines Systems, wie es in Goebl und Färber (2007) beschrieben ist

Ergebnisse anderer Forscher haben gezeigt, dass diese Methodik sehr ineffizient ist.⁴⁸

2.1.8 MobilSoft

Vor dem Hintergrund des immer größer werdenden Anteils von Software an der Wertschöpfung im Automobilbereich hat sich die bayerische Forschungsinitiative *MobilSoft* zum Ziel gesetzt, Software-Entwicklungsprozesse zu erarbeiten, die es ermöglichen, hochvariante Software kosteneffizient zu erstellen. Das Projekt fokussiert unter anderem die Softwareentwicklung im Fahrerassistenzsystembereich. Hermann (2010) beschäftigt sich hierin mit einer *situationsspezifischen Datenverteilung am Beispiel des verteilten Umgebungsmodells für Fahrzeugsoftware*.⁴⁹ In diesem Zusammenhang setzt er sich auch mit der Situationsanalyse für FAS auseinander und definiert deren Aufgabe folgendermaßen:

Die Situationsanalyse wird genutzt, um die im Situationsmodell zusammengefassten Objekte zueinander in Beziehung zu setzen. [...] Das Ergebnis [...] ist die momentane Fahrsituation, bestehend aus den Komponenten Aktion, Interaktion(en) und Verkehrsregeln (Vgl. Hermann (2010), Seite 9).

Der Autor propagiert nicht nur eine zentralisierte Wahrnehmung, sondern auch eine zentral gelagerte Situationsanalyse mit genormtem Ergebnisformat. Dieses Ergebnisformat kodiert die vorher festgelegten Situationen, die sich nach seiner Auffassung gegenseitig ausschließen. Zudem beschreiben bestimmte Parameter die Situationen genauer. Seine Arbeit sieht sowohl die Kommunikation der aktuellen Situation als auch der potentiell zukünftigen Situationen vor. Diese Idee hat einen gewissen Charme, befindet sich doch die Situationsanalyse sehr nah an der Wahrnehmung, deren Szenenbeschreibung somit nicht im verteilten System distribuiert werden muss. Allerdings lassen seine sehr abstrakten Ausführungen aus Sicht der Informatik außer Acht, dass eine Situationsanalyse die funktionseigenen Ziele berücksichtigen muss. Damit läßt sich m.E. nicht für alle Funktionen eine eindeutige Menge an Situationen, geschweige denn deren wichtige Parameter, definieren.

2.2 Ausgewählte deutsche Forschungsgruppen

Im Folgenden werden die Forschungsleistungen aufgeführt, die sich nicht in das Schema der geförderten Projektforschung einordnen lassen. Auch hierbei steht die Frage nach dem Verständnis der Situationsanalyse und deren Aufgabenstellungen im Vordergrund. Weiterhin werden Methoden der Situationsanalyse beschrieben.

⁴⁸Vgl. Mergel (2009); Eidehall und Petersson (2008, 2006); Aso und Kindo (2008); Danielsson u. a. (2007); Broadhurst u. a. (2005, 2004)

⁴⁹Vgl. auch Hermann und Desel (2008); Hermann (2007); Hermann und Lutz (2007)

2.2.1 Technische Universität Braunschweig - CarOLO und der Stadtpilot

Unter dem Namen CarOLO zog das Team der Technischen Universität Braunschweig 2007 erfolgreich in das Finale der DARPA Urban Challenge⁵⁰ ein. Aufbauend auf den dort gemachten Erfahrungen startete es anschließend das Projekt Stadtpilot mit dem Ziel, sich 2010 auf dem Braunschweiger Innenstadtring von einem autonomen, fahrerlosen System chauffieren zu lassen.

In den Darstellungen des Urban Challenge Systems sprechen die Autoren Basarke u. a. (2007) die Notwendigkeit einer Situationsanalyse an, ohne diese explizit aufzuführen. Im Modul *AI (Artificial Intelligence)* subsummieren sie sämtliche Aufgaben der Situationsanalyse und Verhaltensgenerierung. Im Zuge der Wahl einer geeigneten Methodik zur Verhaltensgenerierung wählten sie die *Distributed Architecture for Mobile Navigation (DAMN)*⁵¹ und begründeten diese Entscheidung mit der zunehmenden Komplexität einer zustandsbasierten Alternative:

We first evaluated a high-level 'artificial intelligence' state-based approach [...]. Early tests showed that modeling every state, the car could encounter and describing the correct state transitions resulted in unacceptable complexity. (Vgl. Basarke u. a. (2007), Seite 8)

Im Zuge der Umsetzung merkten die Autoren, dass auch dieser Ansatz nicht alle Situationen abdeckt und führten eine einfache Situationsanalyse ein, um den Verhaltensgenerierungsalgorithmus anzupassen:

Because we have to deal with more complex situations than the DAMN-architecture is designed to accommodate, our software detects situations where a special treatment is necessary. (Vgl. Basarke u. a. (2007), Seite 17)

Eine der Erfahrungen aus der Urban Challenge ist, dass das Versuchsfahrzeug *Caroline* ein auffällig kreativeres Fahrverhalten zeigte als die der anderen Wettbewerbsteilnehmer.⁵² Dies konnte auf die Benutzung des DAMN Ansatzes zurückgeführt werden, der nur einen sehr kurzen Planungshorizont besitzt und kompromisslos die eigenen Ziele verfolgt. Ein Großteil der anderen Teams verfolgte die Strategie der zustandsbasierten Trajektorienplanung, die weniger kreativ, dafür aber vorhersagbarer agiert.

Aus diesem Grund wurde für das Projekt Stadtpilot eine hybride Strategie aufgestellt: Für die Fahrt auf dem Stadtring, bei der aufgrund der strukturierten Umgebung eine eingeschränkte Menge sinnvoller und sicherer Verhaltensweisen definiert werden kann, wird auf einen Zustandsautomaten zurückgegriffen. In weniger strukturierten Domänen

⁵⁰Siehe Kap. 2.3.1

⁵¹Vgl. Rosenblatt (1997)

⁵²Vgl. Wille (2012), Kapitel 5

wie einem Parkplatz und als Rückfallebene in unvorhergesehenen Situationen soll der DAMN oder ein vergleichbares Verfahren genutzt werden. Im Zuge des Architekturdesigns wurde von den Autoren Wille u. a. (2010a) ein Dreischichtenmodell entwickelt, dass auf der obersten Ebene die Situationsanalyse explizit aufführt.⁵³ In seiner noch unveröffentlichten Dissertation beschreibt Wille (2012) die Aufgabe dieses Moduls:

[Die Situationsanalyse] setzt das Wissen über die Szene zu einer Situation zusammen, die dem Fahrentscheider die Aktionsmöglichkeiten aufzeigt.

Ferner konkretisiert er die Aspekte, die einzelne Submodule der Situationsanalyse adressieren. So existiert je ein Submodul für den Spurwechsel, das Kreuzungsverhalten, die Folgefahrt und den Umgang mit Lichtsignalanlagen. Im Wesentlichen erfüllen diese Module die Funktion eines Datenfilters und einfacher Datenaufbereitungen als Vorbereitung der Zustandswechsel des Fahrentscheiders.

2.2.2 Technische Universität Chemnitz

Im Rahmen eines durch die IAV Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr GmbH gesponserten Drittmittelprojektes beschäftigen sich Schubert und Wanielik (2010) an der Technischen Universität Chemnitz mit der Situationsanalyse für fortschrittliche FAS. Konkret erforschen sie die wahrscheinlichkeitsbehaftete Erkennung von Manövern in Spurwechselzenarien.⁵⁴ In der vorgestellten Systemarchitektur sehen sie explizit ein Modul *Situation Assessment and Decision Making* vor und definieren dessen Aufgabe folgendermaßen:

The aim of these [situation assessment] algorithms is to interpret the perceived vehicle environment and evaluate the relations between the detected entities in the current context in order to derive appropriate system reactions (e.g. warnings or driving interventions). Furthermore, the increasing severity of automatic driving tasks such as braking or steering is posing additional requirements on the *self assessment* capabilities of assistance systems in order to avoid inappropriate and dangerous maneuvers. (Vgl. Schubert und Wanielik (2010), Seite 738)

Diese Definition ähnelt der aus Kapitel 1.3, wobei die Autoren die Notwendigkeit der Analyse der eigenen Fähigkeiten für aktiv eingreifende Systeme explizit hervorheben. Der wissenschaftliche Mehrwert ihrer Arbeiten liegt vor allem in der durchgängigen Modellierung der Unsicherheit von der Wahrnehmung bis zum Ende der Situationsanalyse. Die von den Autoren in der Verfolgung dynamischer Objekte genutzte Methode der Bayeschen Netzwerke kommt auch bei der Situationsanalyse zum Einsatz, wobei die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus den Kovarianzen des Trackings berechnet werden. Schubert und Wanielik (2010) möchten mit deren Hilfe bestimmen, ob ein Spurwechsel nach

⁵³Vgl. auch Wille u. a. (2010b, 2009b); Wille und Form (2008)

⁵⁴Vgl. Schubert u. a. (2008, 2009); Schubert und Wanielik (2009); Schubert u. a. (2010)

links, nach rechts oder ein Spurhalten das momentan angebrachteste Manöver darstellt. Die gezeigten Ergebnisse auf der Basis von Simulationen und Realfahrten sind plausibel. So sagt das System zum Zeitpunkt $t=3,6s$ einen Spurwechsel voraus, welchen der Fahrer bei $4s$ auch tatsächlich umsetzt. Allerdings ist der Vorhersagehorizont damit noch sehr klein. Des Weiteren flossen in die Betrachtung lediglich Objektdaten eines Fremdfahrzeugs ein. Komplexere Szenarien oder gitterbasierte Ansätze waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

2.2.3 Technische Universität Darmstadt

Die Autoren Kastner u. a. (2010); Michalke u. a. (2010, 2009); Fritsch u. a. (2008) streben in einer Kooperationsarbeit mit der Honda Research Institute Europe GmbH in Offenbach die Entwicklung einer „all-situation ADAS“⁵⁵ an. Die hierzu notwendige maschinelle Wahrnehmung, die eine „generische Möglichkeit [bieten soll], extrahiertes räumliches Wissen zu repräsentieren und zu kombinieren“⁵⁶ steht im Mittelpunkt ihrer Forschungsarbeiten. Neben einer detaillierten Beschreibung von Wahrnehmungsmethoden, stellen sie auch eine „biologisch motivierte [Gesamt-]Systemarchitektur für eine aktive, aufmerksamkeitsbasierte Szenenanalyse“⁵⁷ vor. Sie unterteilen hierzu ein fortschrittliches FAS funktional in fünf Bereiche: *What pathway*, *Where pathway*, *Static domain-specific tasks*, *System control* und *Environmental interaction*. Die beiden am ausführlichsten beschriebenen Elemente *What* bzw. *Where pathway* sind für die Szenenanalyse innerhalb eines ganz bestimmten Aufmerksamkeitsbereiches bzw. die Datenfusion auf Objektebene zuständig. Diese Ordnung ist angelehnt an die Aufgabenteilung im menschlichen Gehirn: Dort ist der dorsale⁵⁸ Pfad für die Aufmerksamkeitssteuerung verantwortlich, wohingegen der ventrale⁵⁹ Pfad die Lokalisierung und das Tracking von Objekten steuert. Die weiteren Elemente der propagierten Systemstruktur betreffen die Bereitstellung von Informationen, die nicht originär mit einer Objekterkennung und -verfolgung zu tun haben (*Static domain-specific tasks*), die Ansteuerung von Aktuatoren in Form unterlagerter Steuerungen oder Regelkreise (*Environmental interaction*) sowie die funktionsspezifische Entscheidungsvorbereitung und -findung (*System control*). Letztere wurde von den Autoren zwar mit aufgenommen, aber nur sehr rudimentär beschrieben. Eine genaue Definition der Aufgaben der Situationsanalyse oder eine entsprechende Abgrenzung zu Nachbarmodulen ist den Veröffentlichungen nicht zu entnehmen.

Zur Demonstration der implementierten Fähigkeiten stellten Fritsch u. a. (2008) ein Sys-

⁵⁵Vgl. Kastner u. a. (2010), Seite 731

⁵⁶Übersetzt aus dem englischen Originaltext: „a generic way for representing and combining extracted spatial knowledge of the environment“, (Vgl. Kastner u. a. (2010), Seite 731)

⁵⁷Übersetzt aus dem englischen Originaltext: „Biologically motivated system structure for active, attention-based scene analysis“, (Vgl. Michalke u. a. (2010), Seite 734, Figure 1)

⁵⁸dorsal = rückseitig, zur Rückseite hin gelegen

⁵⁹ventral = bauchseitig, zur Bauchseite hin gelegen

tem zur automatischen Notbremsung vor. Als Zielszenario wählten sie die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, bestehend aus einem Fahrzeug. Beachtenswert ist, dass sie das Zielfahrzeug am Ende einer mit Baken gestellten S-Kurve platzierten, wie sie typischerweise am Beginn bzw. am Ende von Autobahnbaustellen vorkommt. Dies macht die Wahrnehmung der Szene besonders komplex. Das Auto fuhr mit 40 km/h und hatte das Ziel, kollisionsfrei vor dem Ziel zum Stehen zu kommen. Bei 60 Versuchen wurde 57 Mal die dreiteilige Warn- und Bremskaskade korrekt ausgelöst, in den verbliebenden drei Durchgängen löste das System entweder zu früh oder gar nicht aus. Das dargestellte Szenario sollte vor allem die Leistungsfähigkeit der Wahrnehmung demonstrieren. Eine umfangreiche Situationsanalyse wurde nicht implementiert. Vielmehr wurde eine rein zeitlückenabhängige Funktionskaskade auf der Basis des Erkennens des stehenden Fahrzeuges umgesetzt, ohne mögliche Ausweichmanöver zu beachten. Betrachtet man das Foto⁶⁰ und berücksichtigt die gefahrene Geschwindigkeit, sollten sich diese aber ergeben.

2.2.4 Mercedes-Benz-Forschung

Hillenbrand (2007) setzt sich als Doktorand bei Mercedes-Benz mit der Entwicklung einer Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung auseinander. Vor allem in schwach strukturierten Stadt- und Überlandszenarien soll dieses System in gefährlichen Situationen durch Warn- und Bremsingriffe in das Geschehen eingreifen. Bereits seine Konferenzbeiträge⁶¹ tragen den Begriff *situation assessment* im Titel und in seiner deutschsprachigen Dissertation definiert er die *Situationsanalyse* über deren Aufgabe im entwickelten Kollisionsvermeidungssystem:

Aufbauend auf den Daten der Umgebungserfassung muss die vorliegende Verkehrssituation beurteilt werden. Dazu ist es erforderlich, die repräsentierten Objekte mit dem eigenen Fahrzeug auf geeignete Weise in Beziehung zu setzen. Im hier betrachteten Fall besteht die Aufgabe konkret darin, die Kritikalität der Situation hinsichtlich einer bevorstehenden Kollision zu bewerten. (Vgl. Hillenbrand (2007), Seite 9f)

Architektonisch setzt Hillenbrand die Situationsanalyse in einem sehr groben Schichtenmodell zwischen die „Umgebungserfassung“ und die „Entscheidung/Regelung“. Ein wesentlicher Beitrag seiner Arbeit ist die Entwicklung von Situationsbewertungsmetriken für die Einschätzung der Kritikalität. Es handelt sich dabei um ein Geflecht aus verschiedenen Zeitmaßen⁶², an deren Ende die Reaktionsreserve des Fahrers (TTR, *Time To React*) ermittelt wird. Seine Metrik liefert eine Gefahreinschätzung bezüglich eines rechteckig

⁶⁰Vgl. Fritsch u. a. (2008), Seite 280, Abb. 5

⁶¹Vgl. Hillenbrand u. a. (2006, 2005)

⁶²TTB *Time To Brake*, TTC *Time To Collision*, TTE *Time To Enter*, TTD *Time To Disappear*, TTK *Time To Kickdown*, TTR *Time To React*, TTS *Time To Steer*; Vgl. Hillenbrand (2007), Seite 118, Abb. 5.2

modellierten, dynamischen Zieles. Für mehrere Ziele rät er zur mehrfachen Anwendung seiner Algorithmen. Es stehen keine gitterbasierten Informationen zur Verfügung, sodass er den befahrbaren Raum als unbegrenzt voraussetzt.⁶³

Bei der Daimler AG wird weiterhin unter der Leitung von Dr. Gabi Breuel seit einigen Jahren am Themenbereich der Situationsanalyse für ADAS geforscht. Neben Arbeiten an einer Simulationsumgebung zur Algorithmikforschung für den aktiven Fußgängerschutz⁶⁴ und der Erkennung von bestimmten Kreuzungssituationen⁶⁵ wird auch an probabilistischen Methoden für die Erkennung beliebiger Manöver als Grundlage eines situativen Verständnisses gearbeitet. Hülhnagen u. a. (2010) präsentieren in diesem Zusammenhang die Nutzung von probabilistic finite-state machines (PFSM) und modellieren beispielhaft ein Abbiegemanöver aus einzelnen „Basiselementen“ wie Bremsen, Langsam Fahren oder Folgen. Die Nutzung von Zustandsautomaten ermöglicht die Abbildung eines zeitlichen Ablaufes der Basiselemente und erleichtert zudem das Verständnis für den Klassifikationsvorgang. Jedes Manöver kann laut den Autoren durch eine einzelne PFSM dargestellt werden. Da verschiedene Manöver somit disjunkt modelliert werden, lässt sich der Pool an zu erkennenden Manövern leicht erweitern, ohne andere anpassen zu müssen. Des Weiteren liefert jede einzelne PFSM Wahrscheinlichkeiten bezüglich des zu klassifizierenden Manövers. Die anhand von Simulationen gezeigten Ergebnisse sind plausibel und stimmen optimistisch, auch wenn das betrachtete Abbiegemanöver als einzelnes noch hinter den postulierten Möglichkeiten der Methodik zurückbleibt.

Ebenfalls unter der Führung von Frau Dr. Breuel entstand die Arbeit von Dagli (2005), welche sich auf die Erkennung von „Einscherer-Situationen“ für ein ACC System konzentriert.⁶⁶ Dagli greift in seiner Dissertation den Begriff der Situation auf, ohne ihn genau zu definieren. Allerdings macht er das Situationsverstehen auf unterschiedlichen Ebenen deutlich. So teilt er die Fahraufgaben in Anlehnung an die Gedanken von Michon (1985) zur Fahrermodellierung in eine strategische, taktische und operationale Ebene auf. Auf der strategischen werden langfristige Ziele verfolgt (z.B. Zielortanfahrt), auf der taktischen Ebene strebt der Fahrer das Erreichen mittelfristiger Ziele, wie beispielsweise das Einordnen auf den richtigen Fahrstreifen zur Abfahrt an, und auf der operationalen Ebene werden elementare Manöver wie das Einscheren sowie Stabilisierungsaufgaben ausgeführt. Auf der operationalen Ebene kann gemäß Dagli die Situation mit Hilfe von Abstands- und Zeitmaßen sowie abgeleiteten Größen beschrieben werden. Auf höheren Ebenen werden für assistierende Systeme Informationen über die Ziele des Fahrers gebraucht, die dem Autor nicht zur Verfügung stehen. Daher fokussiert er ausdrücklich die Situationserkennung auf der operationalen Ebene. Methodisch nutzt er probabilistische Netze, auch um die Unsicherheiten der Eingangsdaten modellieren zu können. Das Verfahren evaluiert er anhand von Daten aus ca. 1000 gefahrenen Testkilometern, vorwiegend auf deutschen

⁶³Vgl. Hillenbrand (2007), Seite 114f

⁶⁴Vgl. Tamke u. a. (2010)

⁶⁵Vgl. Käfer u. a. (2010)

⁶⁶Vgl. auch Dagli u. a. (2004, 2003, 2002); Dagli und Reichardt (2002)

Autobahnen. Im Mittel konnten die Einscherer, eine Sekunde bevor sie die Fahrstreifenmarkierung überfahren, als solche klassifiziert werden. Fehlerkennungen konnten auf die mangelhafte oder fehlende Wahrnehmungsleistung aufgrund der Defokussierung und des Öffnungswinkels des eingesetzten Lasersensors zurückgeführt werden.

2.3 Weltweite Forschungsleistungen

Im Folgenden stehen ausgewählte außereuropäische Forschungsleistungen im Mittelpunkt der Betrachtungen.

2.3.1 DARPA Urban Challenge

Im Jahr 2001 formulierte die amerikanische Regierung im *National Defence Authorization Act* die Anforderung, dass bis zum Jahr 2015 ein Drittel aller Bodenkampffahrzeuge unbemannt sein soll. Um die hierzu notwendige Forschung zu forcieren, rief die DARPA⁶⁷ 2006 zu einem Wettbewerb für autonome Fahrzeuge in urbaner Umgebung auf - die so genannte „Urban Challenge“. Als autonom definierte sie hierbei Fahrzeuge, die ohne menschliche Hilfe oder menschliches Einschreiten navigieren und fahren können.⁶⁸ Bei der Darstellung zum Stand der Technik konzentriert sich die Recherche auf die elf Finalteilnehmer. In den folgenden Ausführungen werden das Team CARolo aus Braunschweig und das Team Annieway aus Karlsruhe/München ausgeklammert, da deren Forschungsleistungen bereits im Zusammenhang mit den Projekten *Stadtplot* (Kap. 2.2.1) bzw. *Sonderforschungsbereich/Transregio 28: Kognitive Automobile* (Kap. 2.1.7) vorgestellt wurden. Die Reihenfolge der Aufführung entspricht der Wichtigkeit aus Sicht dieser Dissertation und nicht dem Ranking aus dem Wettbewerb.⁶⁹

Da alle Teams vor der gleichen Aufgabe standen und sie umfangreiches Vorwissen über die Strecke und die zu erwartenden Szenarien gestellt bekamen, ähneln sich auch die genutzten Konzepte der erfolgreichen Teams. So verwenden alle hierarchische Zustandsautomaten um ihre Verhaltensweisen zu strukturieren. Im Wesentlichen unterscheiden sie dabei nach den Domänen *normal road*, *intersection* sowie *parking lot*, wobei diese Aufteilung teamspezifisch um Initial-, Sicherheits- und Wiederherstellungszustände ergänzt wird. Des Weiteren fassen alle bis auf das Ben Franklin Team die Algorithmen zur Generierung der Szene in ihren Architekturdarstellungen unter dem Begriff *perception* zusammen. Erst bei der Situationsanalyse und der Verhaltensgenerierung zeigen sich erhebliche Unterschiede.

⁶⁷DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency

⁶⁸Übersetzt aus dem englischen Originaltext: „An autonomous ground vehicle is a vehicle that navigates and drives entirely on its own with no human driver and no remote control.“ Vgl. DARPA (2008)

⁶⁹Für eine ausführliche Übersicht der relevanten Veröffentlichungen im Rahmen der DARPA Urban Challenge Vgl. Klein (2010)

Während sich alle Teams intensiv mit der Trajektorienplanung auseinandersetzen, schreiben lediglich drei Teams aus dem Pool der betrachteten Finalteilnehmer explizit von einer situativen Verhaltensausswahl.

Van Dovern u. a. (2007) aus dem Team *Victor Tango* der Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg⁷⁰ definieren die situative Verhaltensausswahl folgendermaßen:

At any given moment, a selection of individual behaviors is chosen to run based on the current situation. This situation is a function of both the goals of the vehicle and the current environment.

Damit treffen Sie das Begriffsverständnis einer Situation, wie es in Kapitel 1.3 erarbeitet wurde. In der Verarbeitungskette ihres Systems ist das Modul *Determine Situation* dafür zuständig, die aktuelle Situation zu bestimmen, auf deren Basis die Verhaltensweisen ausgewählt werden, die um die Ausführung konkurrieren.⁷¹

Vom Team *MIT* in Cambridge⁷² stellen Frazzoli u. a. (2007) die Nutzung eines *Situational Interpreters* vor, der aus der Szene all die Daten filtert und in Beziehung setzt, die für die Planung einer Trajektorie relevant sind. Hierbei bereitet dieses Modul die Entscheidungsfindung des hinterlegten Zustandsautomaten vor. Des Weiteren sorgt ein *Situational Planner* für die Sicherheit des Fahrzeuges, indem er die geplante Trajektorie auf mögliche Kollisionen, eigendynamische Randbedingungen sowie Konsistenz prüft und ggf. anpasst.⁷³

Das Team *Cornell* der Cornell University in New York spricht von einer *situational analysis*, die für die Vorbereitung der Trajektorienplanung im aktuellen Segment verantwortlich ist, ohne weiter darauf einzugehen.⁷⁴

Aus den Reihen der Semifinalisten sind die Arbeiten von DuToit u. a. (2008) aus dem Team Caltech⁷⁵ interessant. Sie beschreiben das „Situational Reasoning for Road Driving in Urban Environment“, welches im Fahrzeug *Alice* zum Einsatz kam. Ein solches *situatives Schlussfolgern* begründen die Autoren mit der Notwendigkeit, Verkehrsregeln einzuhalten bzw. ein adäquates Verhalten zu finden, wenn diese gebrochen werden müssen. Die Aufgabe des entsprechenden Moduls ist die Klassifikation der aktuellen Fahrsituation. Methodisch greift auch dieses Team auf einen Zustandsautomaten zurück, wobei es zusätzlich verschiedene Grade des Fahrverhaltens explizit modellieren. So kann das *Alice* *sicher*, *aggressiv* oder *sehr aggressiv* um Hindernisse fahren. Schon online kann hierdurch

⁷⁰Für weitere Veröffentlichungen des Teams Victor Tango siehe Anderson u. a. (2008); Wicks u. a. (2008); Hurdus und Hong (2008)

⁷¹Vgl. Van Dovern u. a. (2007), Seite 12ff

⁷²Für weitere Veröffentlichungen des Teams MIT siehe Fiore (2008); Kuwata u. a. (2008a,b, 2009)

⁷³Vgl. Frazzoli u. a. (2007), Seite 3 und Seite 17

⁷⁴Vgl. Campbell u. a. (2007), Seite 20

⁷⁵Für weitere Veröffentlichungen des Teams Caltech siehe Wongpiromsarn (2009); Wongpiromsarn und Murray (2008); Di Cairano u. a. (2007)

am Zustandsautomaten die Gefährdung des Fahrzeuges bzw. durch das Fahrzeug abgeschätzt werden. Im Nachhinein sind kritische Passagen ebenfalls leicht identifizierbar. Um die Transitionen des aufgestellten Zustandsautomaten zu schalten, nutzen die Autoren die Informationen der in der Architektur nachgelagerten Planungsmodule. Dadurch steigt die Komplexität der gesamten Planung erheblich und zudem entstehen schwer überschaubare Abhängigkeiten. Dies ist vermutlich auch einer der Gründe für das Ausscheiden des Teams im Semifinale. Oft blieb das Fahrzeug in Fehlermodi hängen und kam zum Beispiel lange Zeit nicht aus der Startzone.⁷⁶

2.3.2 Militärische Grundlagenforschung

Mit der Zielsetzung, die Methodenentwicklung zur Detektion, Klassifikation, Identifikation und zum Tracking von militärisch wichtigen Zielen sowie zur Situations- und Gefährdungsbewertung voranzutreiben, entschied sich das amerikanische Militär Definitionen und Terminologien zur Datenfusion zu entwickeln. Die U.S. Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Group präsentierte in diesem Zusammenhang 1985 ihr Modell zur Datenfusion, das die Ziele und die funktionalen Elemente einer Datenfusionsarchitektur beschreibt.⁷⁷ Die dort festgelegten Begriffe und Strukturen fanden unter dem Namen *JDL Data Fusion Model* weite Verbreitung in militärischen wie auch in anderen Bereichen und werden stetig weiterentwickelt.⁷⁸ In allen Versionen handelt es sich um einen fünfstufigen Fusionsprozess:

Level 0 Signal Refinement

Level 1 Object Refinement

Level 2 Situation Refinement

Level 3 Threat Refinement

Level 4 Process Refinement

Das sogenannte *Situation Refinement* wird jedoch ab der Version von Bowman (2004) mit *Situation Assessment* bezeichnet und wie folgt definiert:

Situation assessment is the estimation and prediction of structures of parts of reality (i.e. of the aggregation of relationships among entities and their implications for the states of the related entities). (Vgl. Steinberg und Bowman (2004))

Diese allgemeine Definition bezieht sich auf die sehr allgemeine Begriffsbestimmung hinsichtlich der Situation selbst:

⁷⁶Vgl. DuToit u. a. (2008), Seite 6ff

⁷⁷Vgl. Klein (2004), Seite 51ff

⁷⁸Für eine Übersicht zur geschichtlichen Entwicklung Vgl. Liggins (2009), Seite 45ff

Estimation of the structures of parts of reality (i.e. of sets of relationships among entities and their implications for the states of the related entities). (Vgl. Liggins (2009), Seite 51)

Für Liggins (2009) ist die *Situation Analysis* nicht ein Synonym sondern vielmehr ein Teil des *Situation Assessment*. Er beschreibt die Aufgaben der *Situation Analysis* wie folgt:

Estimating and predicting relations among entities and their implications for the states of the related entities. (Vgl. Liggins (2009), Seite 440)

Im Zuge der weitergehenden Darstellungen bei Liggins (2009) wird deutlich, dass in verschiedenen Versionen des JDL Data Fusion Model im Level 2 die Analyse der Beziehungen zwischen den Objekten⁷⁹ und die Schlussfolgerung auf deren Attribute im Zentrum stehen. Des Weiteren ist auch die Prädiktion von Elementen ein Teil des Situation Assessment. Zum besseren Verständnis dieser Definitionen muss man sich das Ziel der gesamten Datenfusion vor Augen führen: das Suchen und Beurteilen von Gefahren für die (nationale) Sicherheit. Bei der Beziehungsanalyse werden somit nicht nur räumliche Lagebeziehungen analysiert, sondern auch organisatorische Zusammenhänge gesucht (z.B. Rasterfahndung).

2.4 Forschung zur Erkennung von Einfädelsituationen

Im Bereich der Detektion einer bevorstehenden Einfädelsituation gibt es bislang nur wenige Publikationen. Die Idee der Nutzung des Wissens um eine Einfädelsituation ist in einem Patent von Maas und Leicht (2005) (Robert Bosch GmbH) beschrieben. Außer dieser Anmeldung sind keine weiteren Veröffentlichungen der Erfinder bekannt.

Nicht der Erkennung einer Einfädelsituation direkt, aber den Problemen der Detektion und des Trackings von Fahrzeugen, die zu einer Gruppe gehören, widmen sich Artikel der militärischen Forschung. Motiviert werden diese Arbeiten aus der Notwendigkeit, aus Daten der Luftaufklärung militärisch wichtige Konvois zu identifizieren, diese zu tracken und deren mögliche Zielorte zu bestimmen. Die Forscher können dabei auf Daten eines sogenannten GMTI⁸⁰ zurückgreifen. Hierbei handelt es sich um ein Modul der Radar-Zielerfassung, das aus Radarrohdaten sich bewegende Objekte gegenüber dem Hintergrund herausfiltert. Zudem stehen Informationen über Objektklassen und über Straßennetze aus der Satellitenüberwachung zur Verfügung.

⁷⁹Im Originaltext wird von „Entities“ gesprochen, wobei hierbei nicht nur physische Objekte, sondern auch Signale, Strukturen oder Aggregationen verstanden werden. Vgl. Liggins (2009), Seite 50

⁸⁰GMTI - Ground Moving Target Indication

Pollard u. a. (2010b) vom ONERA⁸¹ in Frankreich beschäftigten sich mit dem Detektionsprozess von Konvois.⁸² Als Klassifikationsmethode greifen sie auf ein dynamisches Bayes'sches Netzwerk zurück, das auf Basis von Geschwindigkeits- und Abstandsmaßen, Fahrzeugklassen sowie Fahrstreifenzuordnungen auf die Existenz eines Konvois schließt. Des Weiteren beschäftigen sie sich mit dem Tracking der Konvois und insbesondere mit dem Problem der Trennung von Fahrzeugen im Konvoi und weiteren, nahe fahrenden Fahrzeugen, die z.B. lediglich überholen. Für diese Aufgabe nutzen die Autoren einen Partikelfilter.

Weitere militärische Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den Problemen der Aufspaltung und Vereinigung von Fahrzeugkonvois. So beschreibt Salaria (2004) von der Temple University in Philadelphia⁸³ einen Algorithmus zur Bestimmung der Orte, an denen sich detektierte Fahrzeugkonvois wahrscheinlich vereinigen werden. Chin u. a. (2005) von den DSO National Labs in Singapur demonstrieren ihre Forschungsergebnisse zum Konvoitracking anhand einer Simulation, bei der sich mehrere Kolonnen im Zeitverlauf aufspalten.

Auch wenn das Ziel der Detektion von Kolonnen und deren Vereinigungspunkt bei den gefundenen Forschungsarbeiten dem Ziel dieser Arbeit gleicht, so sind die gefundenen Ansätze aus dem militärischen Bereich nur bedingt auf die Gegebenheiten im Zivilen übertragbar. Dem zivilen Fahrzeug kommt es zu Gute, dass es selbst Teil der Situation ist und zum Beispiel das Wissen über die eigene Trajektorie spezifisch deuten kann. Des Weiteren ist es für das Assistenzsystem aufgrund seiner Froschperspektive einfacher, die beteiligten Fahrzeuge wahrzunehmen. Eventuelle Täuschungs- und Tarnvorrichtungen müssen von ihm nicht in Betracht gezogen werden. Andererseits ist aus dem gleichen Grund ohne den Einsatz fahrzeugübergreifender Kommunikation (Car2X) nur räumlich begrenztes Wissen über die Straßeninfrastruktur und die beteiligten Objekte vorhanden. Sowohl die Datenbasis als auch die Perspektive unterscheiden sich also wesentlich von denjenigen in der militärischen Forschung. Aus diesem Grund wird mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik zur Erkennung einer Einfädelsituation im Stau wissenschaftliches Neuland betreten.

⁸¹ONERA - Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

⁸²Vgl. auch Pollard u. a. (2010a, 2008)

⁸³Vgl. auch Salaria (2005)

Teil II

Aufgaben und Strukturierung der Situationsanalyse

In Kapitel 1.3 wird der Begriff der Situationsanalyse (SiA) für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme wie folgt definiert:

Die Situationsanalyse untersucht all diejenigen Umstände, die für die Ausführung der angestrebten Fahrerassistenzfunktion zum jeweiligen Zeitpunkt relevant sind.

Mit dieser Beschreibung lassen sich die Aufgaben der Situationsanalyse in zwei Bereiche einteilen:

1. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses einer Fahrerassistenzfunktion muss die SiA alle möglichen, relevanten Umstände explizit beschreiben.
2. Im laufenden Betrieb müssen diese Umstände mit Hilfe geeigneter Algorithmen (wieder-)erkannt werden.

Die folgenden Abschnitte widmen sich diesen Aufgabengebieten, wobei zunächst auf die Aufgaben im Entwicklungsprozess eingegangen wird. Der zweite Abschnitt erläutert anhand der funktionalen Systemarchitektur die Aufgaben der SiA im laufenden Betrieb. Hierbei wird zunächst auf die Stellung der SiA in der Gesamtsystemarchitektur eingegangen. Im Anschluss werden die in der Literatur vorgestellten Lösungen für einzelne Teilaufgaben zusammengefasst, um daraus eine funktionale Systemarchitektur innerhalb der SiA abzuleiten. Die so entwickelte Struktur wird anschließend exemplarisch auf ein Komfort- und ein Sicherheitsassistenzsystem angewendet, um dessen Nutzbarkeit zu demonstrieren.

Im Folgenden wird als Synonym für den Begriff *Umstände* das Wort *Situationsaspekte* benutzt. Hierunter wird eine Aussage verstanden, die die Situation oder einen bestimmten Teil davon beschreibt und das Ergebnis der SiA im laufenden Betrieb darstellt.⁸⁴

⁸⁴Diese Definition lehnt sich an die von Pellkofer (2003), Seite 51 an: „In dieser Arbeit sind die Resultate der Situationsanalyse situationsbeschreibende Aussagen, welche die aktuelle Situation umschreiben und durch sogenannte Situationsaspekte generiert werden.“

3 Aufgabenstellungen im Entwicklungsprozess

Für die Modellierung des Entwicklungsprozesses von mechatronischen Komponenten hat sich in der Automobilbranche das V-Modell durchgesetzt. In Anlehnung an das aus der militärischen Forschung stammende Original bzw. an das V-Modell XT⁸⁵, das auf die Erfordernisse in der Softwareentwicklung ausgelegt ist, schreibt die ISO 26262 für die Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektronischen Systemen in Kraftfahrzeugen ebenfalls V-Modelle für die Entwicklungsprozesse auf System-, Hardware- und Softwareebene vor (siehe Abb. 3.1).

Grundsätzlich wird in allen Varianten des V-Modells das Gesamtsystem entlang des linken, absteigenden Astes in einzelne Teilprobleme partitioniert. Im untersten Element werden die einzelnen Komponenten entsprechend ihrer Spezifikation erschaffen und entlang des rechten, aufsteigenden Astes des Modells werden diese schrittweise in ein Gesamtsystem integriert. Die Grundlage für die Tests auf den einzelnen Integrationsstufen bilden die bereits bei der Partitionierung erarbeiteten Testfälle.

Das V-Modell ist bei einer vollständigen Wissensbasis über den zu erreichenden Funktionsinhalt und die angestrebte Systemausprägung geeignet, den Entwicklungsprozess zu modellieren.⁸⁶ Ist diese Basis nicht gegeben, was vor allem Forschungs- und Vorentwicklungsprojekte charakterisiert, zeigen Erfahrungen aus der Praxis, dass sich inkrementelle und iterative Verhaltensweisen ausbilden, bei denen das V-Modell oder Teile davon mehrmals durchlaufen werden müssen.⁸⁷ Aus diesem Grund stellen Maurer und Wörsdörfer (2002) einen Entwicklungsablauf vor, der den Erfordernissen bei unvollständiger Wissensbasis Rechnung trägt. In dieser in Abbildung 3.2 gezeigten Struktur ergeben sich zwei Entwicklungsschleifen: Bei der ersten wird das Zwischenergebnis genutzt, um verschiedene Systeme oder Systemausprägungen miteinander vergleichen zu können. Bis zu diesem Punkt wird lediglich auf Expertenwissen zurückgegriffen, um theoretisch ohne den Bau von Prototypen und damit zeitsparend die zentralen Auslegungskonflikte identifizieren zu können. Erst im vollständigen Umlauf werden serienrelevante Themen wie das Package oder die Systemarchitektur behandelt. Ziel ist die Erstellung eines Lastenheftes, das je nach Umfang Teilen oder der Gesamtheit des linken Astes samt Testspezifikationen im

⁸⁵Vgl. Höhn (2008)

⁸⁶Vgl. Reif (2009)

⁸⁷Vgl. Schäuffele und Zurawka (2006)

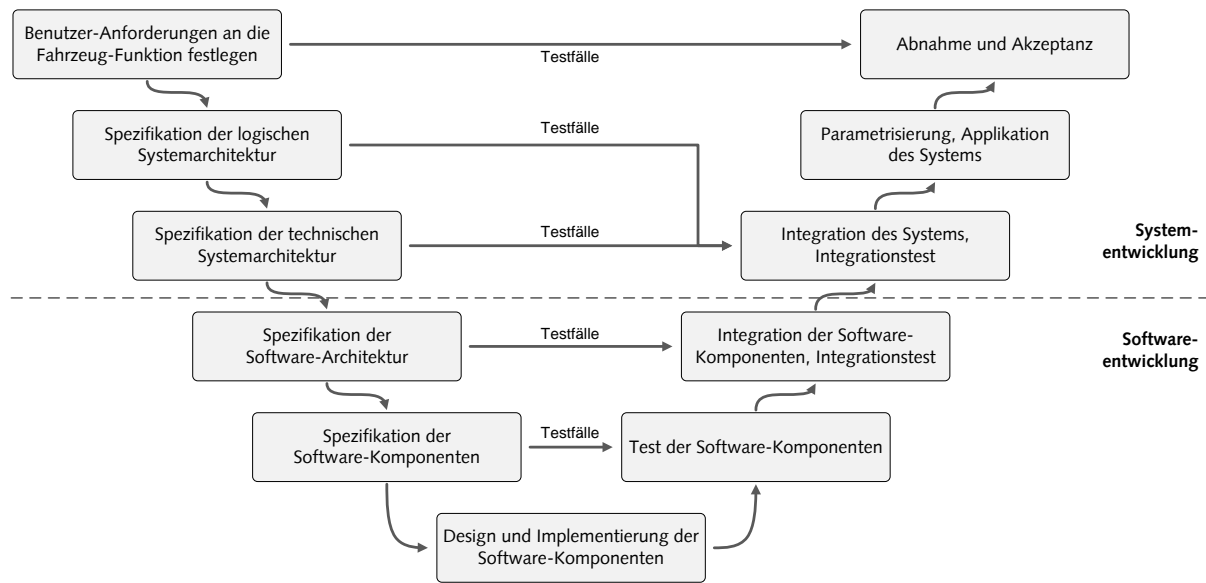


Abbildung 3.1: Systematische Softwareentwicklung nach dem V-Modell

V-Modell entspricht. Bei forschenden und vorentwickelnden Automobilbauern markiert dieser Punkt idealerweise den Schritt aus der Forschung/Vorentwicklung in die Serienentwicklung, bei der das Lastenheft die Basis für entsprechende Beauftragungen darstellt. Das originale Entwicklungsmodell von Maurer und Wörsdörfer (2002) wurde aus diesem Grund um die Abzweigung zum V-Modell, wie es bereits in Abbildung 3.1 gezeigt wird, erweitert.

Neben der Orientierung am Kunden steht für Maurer und Wörsdörfer (2002) auch die Frage nach der technischen Realisierbarkeit im Vordergrund. Hierbei treffen die Anforderungen aus der Funktion, die sich aus Studien, Unfalldatenanalysen und Marktbefragungen ergeben, auf die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung sowie der Situationsanalyse. Ein solcher, von den Kundenanforderungen ausgehender Entwicklungsprozess wird als Top-Down Prozess bezeichnet und spiegelt den linken, absteigenden Ast des V-Modells wider. Wenn die wesentlichen Elemente der funktionalen Ausgestaltung aufgrund der verfügbaren Wahrnehmungsleistung definiert werden, dann spricht man von einem Bottom-Up Entwicklungsprozess. Meitinger (2009) erarbeitet in seiner Dissertation einen gemischten, am Top-Down Prinzip orientierten Entwicklungsprozess am Beispiel aktiver Sicherheitssysteme in komplexen Umgebungen. Der in Abbildung 3.3 dargestellte Prozess geht zum einen von Unfallanalysen aus und damit aus Kundensicht vor und berücksichtigt zudem bereits zu Beginn technische Machbarkeitsüberlegungen. Diese zielen besonders auf die Möglichkeiten der Fahrumgebungserfassung sowie der Situationsinterpretation ab. In seiner Arbeit versteht Meitinger (2009) unter der Situationsinterpretation diejenige Instanz,

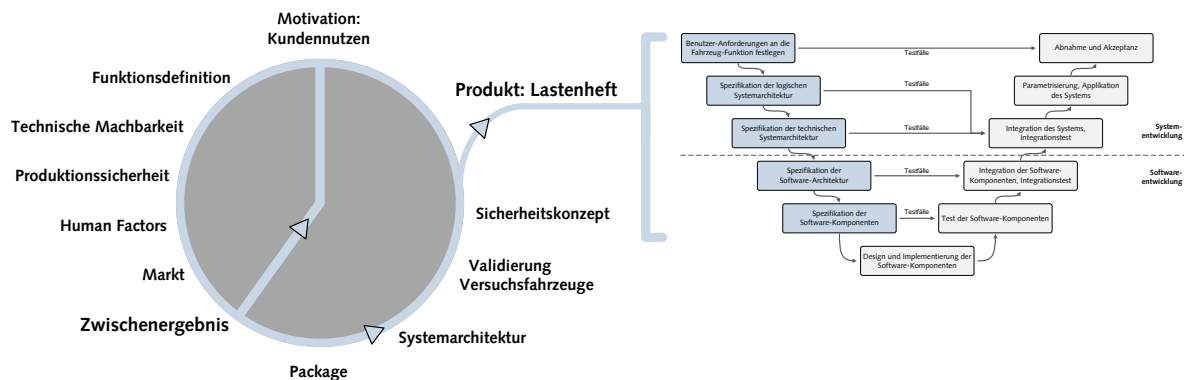


Abbildung 3.2: Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen nach Maurer und Wörsdörfer (2002), erweitert um den Übergang in das in der Serienentwicklung übliche V-Modell

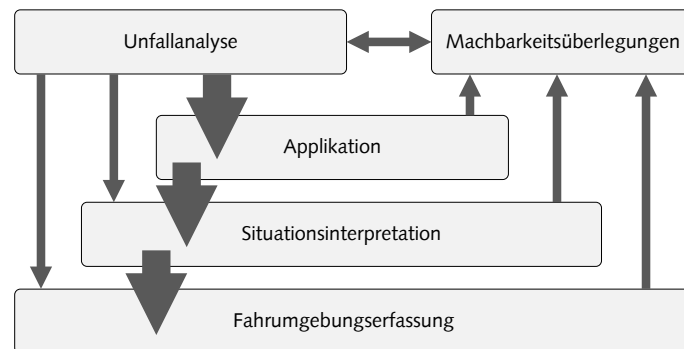


Abbildung 3.3: Top-Down orientierter Entwicklungsprozess für aktive Sicherheitssysteme in komplexen Umgebungen nach Meitinger (2009), Seite 16

in der die Sensordaten zu einem Gesamtbild der Fahrumgebung zusammengesetzt (Sensordatenfusion) und einer bestimmten Verkehrssituation zugeordnet werden. (Vgl. Meitinger (2009), Seite 14)

Sowohl der von Maurer und Wörsdörfer (2002) als auch der von Meitinger (2009) vorgestellte Prozess beinhaltet das Abgleichen der Anforderungen aus Kundensicht mit den technischen Möglichkeiten. Begreift man die SiA nicht nur als funktionales Glied eines operierenden Systems, sondern als Teil des Entwicklungsprozesses einer FAS, dann können ihr in diesem Zusammenhang folgende Aufgaben zugeteilt werden:

- Bestimmung der systemrelevanten Situationsaspekte, die sich aus Studien, Befragungen oder / und Unfallanalysen ergeben
- Beschreibung der Informationen, die über die Situationsaspekte bekannt sein müssen

-
- Beschreibung der Gütekriterien und deren Ausprägungen, die zu den einzelnen Informationen bekannt sein müssen

Aus diesen meist anwendungsfallbezogenen Beschreibungen ist es für die Fahrumgebungs-erfassung möglich, die notwendigen Kriterien für die Sensor- und Algorithmenwahl zu gewinnen bzw. die technische Realisierbarkeit abzuschätzen. Als Beschreibungssprache für die Situationsaspekte eignet sich zum Beispiel die in Entin u. a. (2009) vorgestellte formale Testspezifikationsmethodik, in der statische wie sich dynamisch entwickelnde Szenarien und deren Anforderungen an das System abgebildet werden können.

4 Funktionale Aufgabenstellungen

In diesem Kapitel wird die Situationsanalyse zunächst als funktionaler Block in das Gesamtsystem eingebettet. Hierzu wird auf bewährte Architekturen aus dem Bereich des autonomen Fahrens zurückgegriffen. Da bislang nur vereinzelte Detaillierungen der Aufgaben der Situationsanalyse in der Literatur vorgestellt wurden, beschäftigt sich der anschließende Abschnitt mit der Herleitung einer allgemein gültigen funktionalen Architektur innerhalb der Situationsanalyse. Hierbei dienen die in Kapitel 2, *Stand der Technik*, ausgewerteten Veröffentlichungen als Grundlage. Daran anschließend werden zwei Beispielapplikationen - eine Stauassistentz sowie eine automatische Gefahrenbremsung - der erarbeiteten Architektur gegenübergestellt, um deren Anwendbarkeit zu demonstrieren.

4.1 Begriffsdefinitionen

Für das Verständnis der weiteren Ausführungen werden an dieser Stelle zunächst die folgenden Begriffe definiert:

Systemarchitektur

In dieser Arbeit wird auf die Definition von Bass u. a. (2003) zurückgegriffen:

Die *Systemarchitektur* eines Systems beschreibt dessen Struktur respektive dessen Strukturen, dessen Bausteine (Software- und Hardware-Bausteine) sowie deren sichtbare Eigenschaften und Beziehungen zueinander. (Vgl. Bass u. a. (2003) sowie Vogel u. a. (2005), Seite 48)

In Anlehnung an die verschiedenen Darstellungen einer Gebäudestruktur (Grundriss, Elektroplan...) werden auch für die *Systemarchitektur* verschiedene Sichten unterschieden.⁸⁸ Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf die *Bausteinsicht*, aus der der interne (statische) Aufbau eines Systems, dessen Subsysteme und Komponenten sowie deren Schnittstellen zueinander gezeigt werden.

Primäre und sekundäre Wahrnehmung

Hofmann (2004) beschreibt in seiner Dissertation den Umfang der *maschinellen Wahrnehmung* folgendermaßen:

⁸⁸Vgl. Starke (2009), Seite 15

[Die] maschinelle Wahrnehmung beinhaltet neben der reinen Extraktion von Merkmalen aus einem Sensorsignal auch eine Vorstellung über die Gestalt und das aspektabhängige Erscheinungsbild im Situationskontext und Vorstellungen über das zeitliche Verhalten von Objekten und Subjekten.

Im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen hat die *Wahrnehmung* somit die Aufgabe, die Sensordaten aufzubereiten, zu fusionieren und ein Abbild der gegenwärtigen und zukünftigen Umwelt einschließlich des EGO-Fahrzeuges und der Insassen zur Verfügung zu stellen. Diese im Verarbeitungsprozess zuerst angesiedelte Herausforderung wird als *primäre Wahrnehmung* bezeichnet. Die anschließende *sekundäre Wahrnehmung* erschließt Aussagen über das aspektabhängige Erscheinungsbild wie zum Beispiel Beziehungen zwischen Objekten (Relationen, Interaktionen), Klassifikationen der ausgeführten und beabsichtigten Manöver sowie von Teilsituationen und eine Interpretation der Daten in Hinblick auf die Bedürfnisse der Verhaltensgenerierung.

Verhaltensgenerierung, -entscheidung und -ausplanung

Tölle (1996) beschäftigt sich mit dem Begriff der automatischen Fahrzeugführung und definiert diesen wie folgt:

Die Aufgabe der automatischen Fahrzeugführung besteht darin, die Sollverläufe für die Längs- und Querführung unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Informationen derart zu berechnen [...], dass das Fahrzeug sicher (d.h. kollisionsfrei) und komfortabel im Straßenverkehr bewegt wird. (Vgl. Tölle (1996), S. 11)

Diese Definition wird von Siedersberger (2003) aufgegriffen und dient als Basis des von ihm vorgestellten Fähigkeitenkonzeptes für die Fahrzeugführung. Hierbei werden verschiedene Fahrhandlungen als Fahrmanöver beschrieben, die im Sinne der Definition von Tölle (1996) durch die Berechnung von Sollverläufen erst konkretisiert werden. Da die einzelnen Manöver jeweils nur in einem bestimmten Arbeitsbereich gültig sind, ist zudem eine Entscheidungsinstanz notwendig, um aus dem Pool der möglichen Fahrmanöver eines oder mehrere parallel agierende auszuwählen.⁸⁹ Diese Entscheidungsinstanz wird im folgenden *Verhaltensentscheidung* genannt. Die *Verhaltensausplanung* hat zur Aufgabe, die über einzelne Fähigkeiten beschriebenen Aktionen so weit zu konkretisieren, dass sie durch aktornahe Steuerungen und Regelungen umgesetzt werden können. Damit deckt die *Verhaltensausplanung* den von Tölle (1996) aufgeworfenen Begriff der automatischen Fahrzeugführung ab.

Die *Verhaltensgenerierung* vereint die *Verhaltensentscheidung* und die *Verhaltensausplanung*, denn erst beide zusammen bestimmen das nach außen sichtbare Verhalten. Ebenso wie das Fähigkeitenkonzept von Siedersberger (2003) nicht auf die Fahrzeugführung allein beschränkt ist, wird in dieser Arbeit das Bewegungsverhalten nicht als einzige Verhaltens-

⁸⁹Vgl. Siedersberger (2003)

möglichkeit betrachtet. Vielmehr integriert der Begriff der *Verhaltensgenerierung* auch die Aspekte der Mensch-Maschine Kommunikation, sämtliche weiteren Aktionsmöglichkeiten eines Fahrzeuges (z.B. Fensterheber, Gurtstraffer) sowie dessen Kommunikation mit der Umwelt (Car-X als Sender).

Objekt

Unter einem *Objekt* wird die Abbildung eines in der Welt real existierenden Elementes bzw. einer Gruppe solcher Elemente verstanden, das zudem über eine Menge an Attributen näher beschrieben wird. In der Literatur werden Fahrzeuge im EGO-Umfeld oft als „dynamische Objekte“ bezeichnet, denen dynamische Zustände attribuiert werden. In dieser Arbeit ist der Begriff weiter gefasst und kann beispielsweise auch für Fahrstreifen, Kolonnenspuren, Ampeln, Fußgänger usw. stehen.

4.2 Funktionale Gesamtarchitektur für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme

Funktionale Architekturen des Gesamtsystems finden sich beispielsweise in Siedersberger (2003), Maurer (2000) oder bei Stiller u. a. (2008a) (siehe Abb. 4.2 und 4.3). Obwohl diese Darstellungen sich auf autonome Systeme beziehen, können sie als Grundlage eines FAS herangezogen werden, stellen die einzelnen FAS doch Teilautomation der Fahraufgabe dar. Grundlage dieser Gesamtarchitekturen ist das in Abbildung 4.1 gezeigte Verhaltensmodell eines menschlichen Fahrers, das von Rasmussen (1983) vorgestellt wurde und die Aufgaben nach dem Grad der Abstraktion, des Zeithorizontes bzw. der Repräsentationsformen⁹⁰ in drei Gruppen einteilt:

Auf der **fertigkeitsbasierten Ebene** wird das Fahrzeug vom Fahrer mittels einfacher Reiz-Reaktionsmechanismen stabilisiert. Dem Fahrer sind die Handlungen nicht bewusst und sie haben sehr kurzfristigen Charakter. Hierzu zählt beispielsweise das Halten des Fahrzeuges innerhalb der Fahrstreifenbegrenzungen.

Auf der **regelbasierten Ebene** werden vom Fahrer für wiedererkannte Situationen bekannte Verhaltensmuster abgearbeitet. Ein Beispiel ist das Heranfahren an eine Kreuzung mit zu beachtenden Vorfahrtsregeln.

Auf der **wissensbasierten Ebene** agiert der Fahrer immer dann, wenn ihm Situationen unbekannt sind und adäquate Verhaltensmuster erst durch bewusste Überlegung gefunden werden müssen. Dieser Prozess ist meist ein Optimierungs- oder

⁹⁰Auf die Einteilung nach den Repräsentationsformen des jeweiligen Wissens in Signal, Zeichen und Symbole wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Vgl. hierzu Rasmussen (1983) oder auch Maurer (2000), Seite 28ff

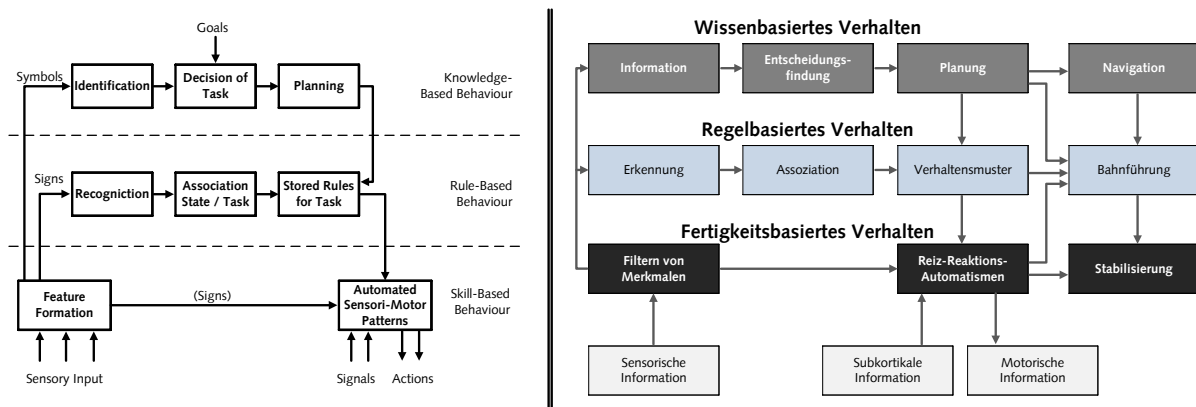


Abbildung 4.1: Verhaltensmodell der menschlichen Fahrzeugführung; Links: Ursprungs-
version von Rasmussen (1983), Rechts: Übersetzte und adaptierte Version
entnommen aus Stiller u. a. (2008a)

Abwägungsprozess, wobei der Mensch auf ein eigenes, internes Modell der Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Interaktion zurückgreift und einen Plan erstellt. Aufgrund der Langfristigkeit des Überlegungsprozesses und der lang anhaltenden Auswirkungen der Entscheidungen werden die Tätigkeiten der Navigation des Fahrzeuges der wissensbasierten Ebene zugesprochen.

Bei den funktionalen Gesamtsystemarchitekturen, wie sie in den Abbildungen 4.2 bzw. 4.3 zu finden sind, wird die Situationsanalyse⁹¹ der Wahrnehmung zugeordnet. In Anlehnung an das Verhaltensmodell von Rasmussen (1983) sehen Siedersberger (2003) sowie Maurer (2000) die Situationsanalyse sowohl auf der verhaltensbasierten als auch auf der wissensbasierten Ebene. In Stiller u. a. (2008a) sind die Äquivalenzen zum Verhaltensmodell eines menschlichen Fahrers nicht mehr im Architekturbild verankert. Vielmehr verweisen die Autoren darauf, dass sie die derzeitigen wissenschaftlichen Herausforderungen für die Situationsanalyse sowie für die Verhaltensentscheidung auf der wissensbasierten Ebene sehen. Eine streng an Rasmussen (1983) angelehnte Systemarchitektur hat zudem den Nachteil, dass beim Vorbild des Menschen auf der wissensbasierten Ebene oftmals wiederholte Entscheidungsabläufe zu einem Training führen und somit in ein regelbasiertes oder sogar fertigkeitsbasiertes Verhalten übergehen. Dieser Übergang ist in einer statischen Architektur nicht darstellbar.

Maurer (2000) spricht in seiner Arbeit von *Meta-Regeln*, die auf der wissensbasierten Ebene angewandt werden, ohne diese genauer zu beschreiben. Wenn man Meta-Regeln

⁹¹An dieser Stelle wird unterstellt, dass Siedersberger (2003) und Maurer (2000) unter dem Begriff der „Situationserfassung“ sowie Stiller u. a. (2008a) unter dem Begriff der „Situationsinterpretation“ im Wesentlichen den Inhalt der *Situationsanalyse* verstehen, wie er für diese Arbeit in Kap. 1.3 definiert wurde.

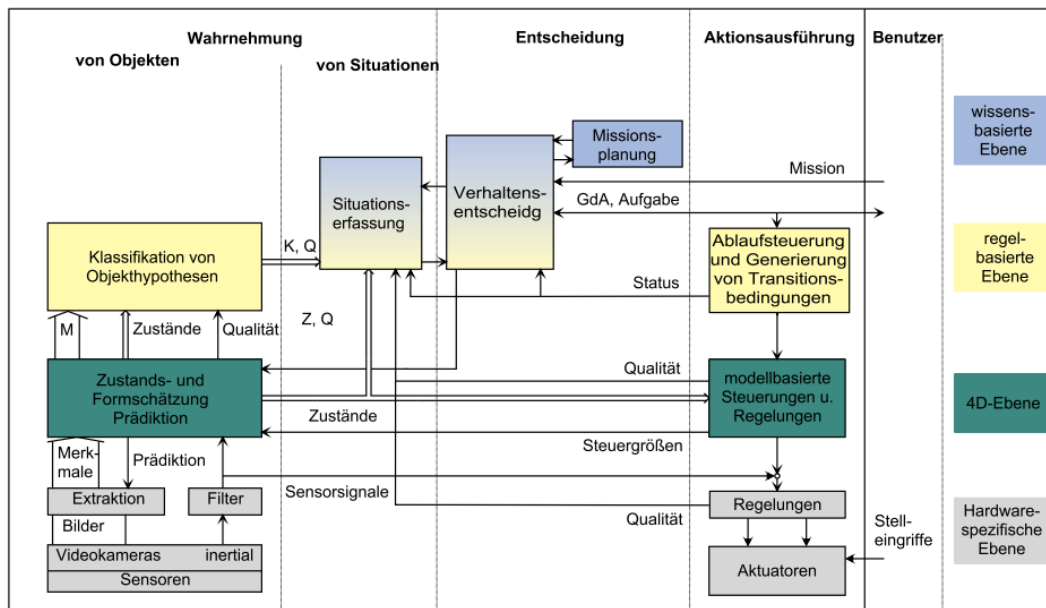


Abbildung 4.2: Funktionale Gesamtarchitektur entnommen aus Siedersberger (2003), in Anlehnung an Maurer (2000); GdA: Grad der Autonomie; K: Klasse, der ein physikalisches Objekt zugeordnet wurde; M: Merkmale; Q: Qualität; Z: Zustände

als Regeln über (das Bilden von) Regeln auffasst⁹², dann entsprechen diese den Regeln zum Trainieren von Systemen bei lernenden Verfahren, wie sie beispielsweise in dieser Arbeit für die Erkennung von Einfädelsituationen verwendet werden (siehe Teil IV). Im laufenden Betrieb sind diese allerdings in der Architektur nicht mehr zu finden; dort spiegeln sich vielmehr die gebildeten Regeln in Form parametrierter Klassifikatoren wider.

Ausgehend von den in den Abbildungen 4.2 und 4.3 gezeigten Systemstrukturen kann die in Abbildung 4.4 dargestellte grobe Systemstruktur abgeleitet werden. Hierbei wird deutlich, dass die Situationsanalyse das Verbindungsglied zwischen der primären Wahrnehmung und der Verhaltensentscheidung bildet und gleichzeitig als Teil der Wahrnehmung gesehen werden kann. Entlang der Kette der Entscheidungsfindung werden mittels Sensoren und Empfängern Informationen über die Umwelt, das Eigenfahrzeug sowie dessen Insassen gesammelt. In Erweiterung zum rein boardautonomen System nach Siedersberger (2003) und Maurer (2000) trägt die Aufnahme von Empfängern bzw. Sendern auf der hardware-spezifischen Ebene der wachsenden Bedeutung von Car2X Technologien Rechnung. Die primäre Wahrnehmung hat die Aufgabe, die gesammelten (Roh-)Daten zu einem möglichst konsistenten Umfeldmodell aufzubereiten. Die anschließende Situationsanalyse

⁹²In Anlehnung an die Definition des Begriffes Meta-Daten durch Marco (2000): „Meta-Data ist data about data“

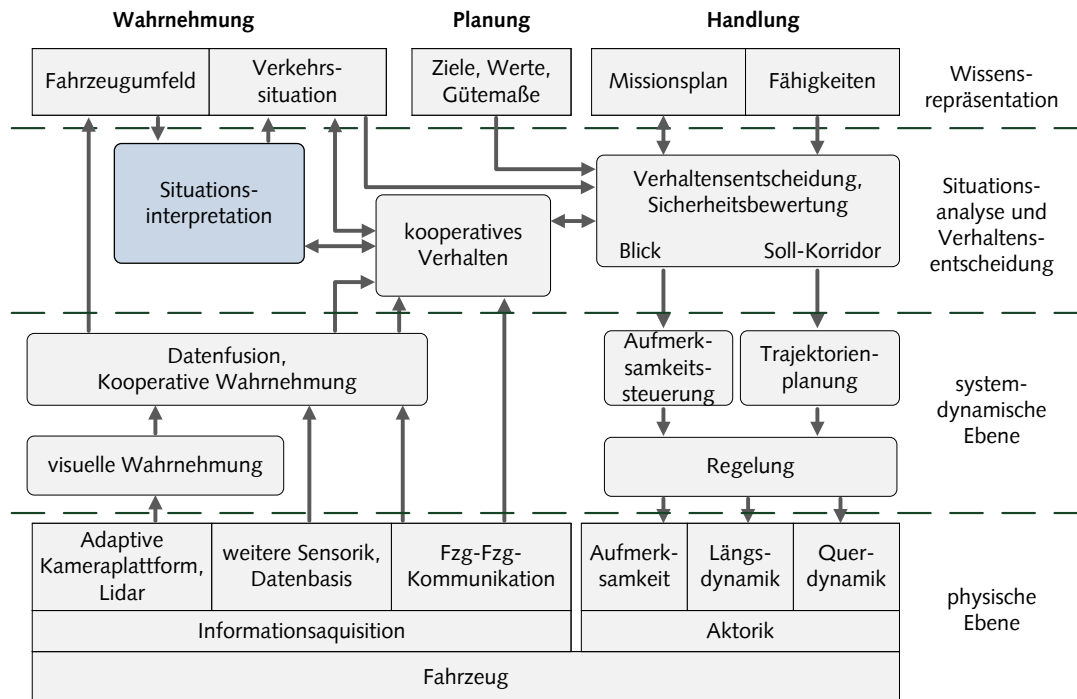


Abbildung 4.3: Funktionale Gesamtsystemarchitektur entnommen aus Stiller u. a. (2008a)

extrahiert die für die jeweilige Funktion zum jeweiligen Zeitpunkt notwendigen Daten und bereitet sie für die Verhaltensentscheidung als auch die Verhaltensausplanung auf. In Kapitel 4.3 werden die Aufgaben innerhalb der Situationsanalyse detailliert. Die von der Verhaltensentscheidung ausgewählten Verhaltensweisen werden in der Verhaltensausplanung konkretisiert und von den Aktoren ausgeführt bzw. über die Sender kommuniziert.

In der Abbildung 4.4 findet sich darüber hinaus eine kreisförmige Struktur aus den Komponenten Bewerten, Abwägen, Planen und Handeln. Hierbei handelt es sich um eine Adaption des Modells menschlicher Entscheidungsprozesse von Heckhausen und Heckhausen (2006), das auf den Prozess der Informationsverarbeitung im FAS-System übertragen wird. Eine solche Möglichkeit der Strukturierung wird an dieser Stelle vorgeschlagen, da das technische System sich ebenfalls dem Problem der Entscheidungsfindung und -umsetzung widmet. In der Abbildung 4.5 ist das von Heckhausen und Heckhausen (2006) entwickelte Entscheidungsmodell dargestellt. Die darin vorkommenden Wechsel zwischen dem Abwägen, Planen, Handeln und dem Bewerten beschreiben die Autoren wie folgt:

Der 1. Übergang ist der der **Intentionsbildung**, die den Umbruch zwischen der Motivationsphase des Abwägens von Motivationstendenzen und den Volitionsphasen des Planens und Handelns auslöst. Intentionsbildungsprozesse regeln, welche der zu jeder Zeit simultan vorliegenden und je nach Situation und Bedürfniszustand auf- und abschwelenden Motivationstendenzen jeweils

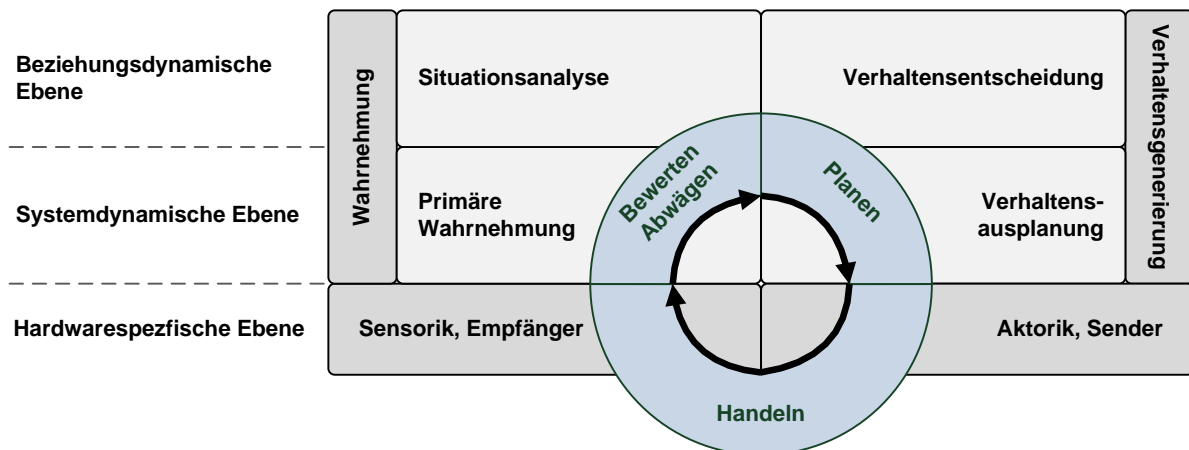


Abbildung 4.4: Grobe Funktionale Systemarchitektur zur Einordnung der Situationsanalyse in den Gesamtkontext

Zugang zum eigentlichen Handeln gewinnen. (Vgl. Heckhausen und Heckhausen (2006))

In diesem Zusammenhang beschreibt die **Motivation**

die an der Auswahl und dem Setzen von Zielen beteiligten Prozesse (Vgl. Heckhausen und Heckhausen (2006)),

wohingegen die **Volition**

sich auf regulative Prozesse, die entscheiden, welche Motivationstendenzen wann und bei welcher Gelegenheit wie in Handlungen umgesetzt werden sollen, bezieht. (Vgl. Heckhausen und Heckhausen (2006))

Diesem Verständnis nach dient die Wahrnehmung im technischen System dazu, die Situation und den Bedürfniszustand (des Fahrers) zu ermitteln, um auf die auf- und abschwelenden Motivationstendenzen zu schließen. Der erste Übergang im Entscheidungsmodell entspricht somit dem Wechsel von der Situationsanalyse zur Verhaltensentscheidung. Hierbei wird bestimmt, welche Motivationstendenzen überhaupt Zugang zur Verhaltensausplanung und Umsetzung finden. Die angesprochenen auf- und abschwelenden Tendenzen können in verhaltensbasierten (reaktiven) Systemen beobachtet werden. Dabei gelangt in jedem Zyklus nur dasjenige Verhalten bzw. diejenige Verhaltensausprägung zur Ausführung, die nach einer Kostenabschätzung die höchste Zielerreichung aufweist.⁹³ Anhand des Verlaufes der Kosten jeder Variante sind die auf- und abschwelenden Tendenzen im System explizit repräsentiert.

⁹³Beispielsweise das DAMN Verfahren nach Rosenblatt (1997)

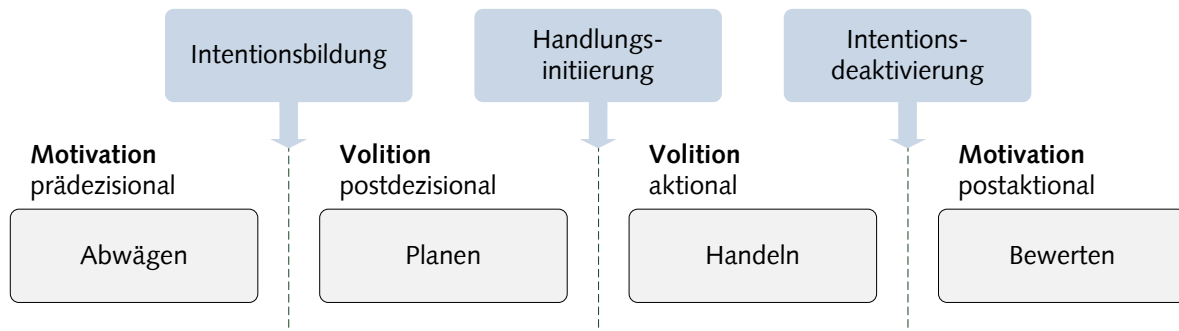


Abbildung 4.5: Modell des menschlichen Entscheidungs- und Handlungsprozesses nach Heckhausen und Heckhausen (2006), Seite 7

Der nachfolgende Übergang der **Handlungsinitiiierung** ist im Entscheidungsmodell definiert als

der [Übergang] zwischen den beiden volitionalen Phasen des Planens und des Handelns. Die **Handlungsinitiiierung** regelt, welche von den schon bereitliegenden oder gerade frisch gebildeten Intentionen zum jeweiligen Zeitpunkt Zugang zum Handeln erhält, um realisiert zu werden. (Vgl. Heckhausen und Heckhausen (2006))

Der Begriff der Intention beschreibt eine Handlungsabsicht. Die Autoren sprechen von „schon bereitliegenden Intentionen“, worunter im technischen System Handlungsschemata verstanden werden können, die durch die vorherige Aktivierung (Verhaltensentscheidung) und Konkretisierung (Verhaltensausplanung) die notwendigen Sollwertverläufe bereitstellen, die dann mittels (unterlagerter) Regelkreise oder Steuerungen in der Handlungsphase ausgeführt werden.

Interessant ist die im Modell des menschlichen Entscheidungsprozesses vorgesehene **Intensionsdeaktivierung**:

Nach Abschluss oder erfolglosem Abbruch der Handlung kommt es dann zur **Intensionsdeaktivierung**, die wieder einen Umbruch bewirkt, diesmal von einer volitionalen in eine motivationale Phase der Bewertung der zurückliegenden Handlung und der Ursachenerklärung für Handlungserfolg und v. a. für Misserfolg.

Die Intensionsdeaktivierung spielt beim Menschen eine bedeutende Rolle, ist es diesem doch oft wichtig, eine Sache „zu Ende zu bringen“. Gerade dieses Beenden eines aktiven Vorganges bedarf einer bewussten Entscheidung. Im technischen System ist das Beenden eines aktiven Verhaltens bzw. einer aktiven Verhaltensausprägung dadurch gekennzeichnet, dass ein neues Verhalten an dessen Stelle tritt. Entsprechend der Aussage zur Kommunikation, wonach „man nicht nicht kommunizieren kann“, kann sich ein automatisches

System nicht nicht verhalten. Auch Phasen ohne aktiven Eingriff stellen ein Verhalten dar. Damit existiert zu jeder Intentionsdeaktivierung auch eine Intentionsaktivierung.

Aus dem Modell des menschlichen Entscheidungsprozesses kann für das technische System eine Eigenschaft abgeleitet werden, die in dieser Form in der Literatur noch nicht explizit beschrieben wurde: das Aufstellen von Bewertungsstrategien für ein komplexes Verhalten. Es existieren bereits zahlreiche Ansätze, die Güte der Handlungsausführung mit regelungstechnischen Methoden zu beschreiben (z.B. Überschwingweite, Ein- und Ausregelzeiten) oder den Zielerreichungsgrad atomarer Handlungsmuster im laufenden Betrieb zu evaluieren (z.B. Time to Line Crossing (TLC)). Allerdings sind keine Bewertungsmethoden bekannt, die zum Beispiel die Güte des Verhaltens „Überholen“ im laufenden Betrieb a posteriori beurteilen, über Erfolg oder Misserfolg entscheiden oder gar einen eventuellen Misserfolg erklären. Für ein parallel agierendes Sicherheitssystem scheint dieser Ansatz ein wissenschaftlich interessantes Feld zu bieten. Diese Arbeit hingegen beschränkt sich darauf, die bekannten Gütekriterien für die Verhaltensgenerierung zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund wurde der Teil *Bewerten* in der groben Systemarchitektur in Abbildung 4.4 der Wahrnehmung zugeordnet.

4.3 Funktionale Architektur innerhalb der Situationsanalyse

In der Literatur konnte keine umfassende Darstellung der funktionalen Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse gefunden werden. Entweder liegt die Beschreibung von Gesamtsystemen vor, bei denen die Situationsanalyse als ein Modul angesehen wird⁹⁴, oder die einzelnen Artikel beschreiben Lösungen für einzelne Aufgabenstellungen, ohne eine Übersicht über das gesamte Aufgabenspektrum der Situationsanalyse zu geben. Aus diesem Grund werden die bislang unter dem Begriff der Situationsanalyse⁹⁵ publizierten Aspekte genutzt, um eine möglichst vollständige Aufgabendetaillierung abzuleiten. In diesem Zuge können neun klar voneinander abgrenzbare Teilaufgaben identifiziert werden: funktionsspezifische Extraktion, Relationslagenbestimmung, Manöverbestimmung, Bestimmung von Interaktionsbeziehungen, Detektion definierter (Teil-)Situationen, Intentionsschätzung, Prädiktion von (Teil-)Situationen, Situationsinterpretation sowie eine Rückwirkungsanalyse. Auf den folgenden Seiten werden diese Begriffe erläutert. Zunächst steht allerdings die Abbildung der in der Literatur gefundenen Inhalte hinsichtlich dieser Teilaufgaben sowie die sinnvolle Strukturierung zu einer funktionalen Architektur im Vordergrund.

⁹⁴Vgl. Kapitel 4.2

⁹⁵Für die in der Literatur ebenfalls verwendeten Begriffe der *Situationserfassung* als auch der *Situationsinterpretation* wird hierbei unterstellt, dass die Autoren im Wesentlichen ebenfalls den Inhalt der *Situationsanalyse* adressieren.

In Tabelle 4.1 sind die bereits in Kapitel 2, *Stand der Technik*, ausführlicher besprochenen Veröffentlichungen den identifizierten Aufgabenstellungen zugeordnet. Diese Zuordnung wurde immer dann vorgenommen, wenn in dem entsprechenden Artikel explizit Methoden für die entsprechende Teilaufgabe beschrieben werden oder Annahmen dokumentiert sind, die eine bewusste Beachtung des Teilaspektes aufzeigen. Aufgrund des Umfanges der zur Verfügung stehenden Literatur sowie der Dynamik im Forschungsfeld Situationsanalyse erhebt diese Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich der aufgelisteten Publikationen. Hingegen sollten sich weitere Forschungsergebnisse nahezu vollständig in der aufgestellten Gliederung abbilden lassen.

In Abbildung 4.6 ist die aus den Teilaufgaben entwickelte Detaillierung der funktionalen Architektur dargestellt, die die einzelnen Aufgaben nach deren Abarbeitungsreihenfolge strukturiert. Sie greift die zuvor in Kapitel 4.2 erarbeitete Gesamtsystemarchitektur auf und konkretisiert den Teil der Situationsanalyse. Die einzelnen Aufgabenstellungen in Abbildung 4.6 lassen sich grundsätzlich in den ersten Analyseschritt bezüglich der aktuellen Umstände und eine nachgelagerte Analyse zukünftiger Entwicklungen gliedern. Die Verkettung der einzelnen Teilaufgaben erfolgt aufgrund der Abhängigkeiten untereinander und basiert auf eigenen Erfahrungen. So kann z.B. ein Spurwechselmanöver erst dann bestimmt werden, wenn Relationslagen zwischen einem Objekt und der Straßenstrukturierung (Fahrstreifen) bekannt sind. Deutlicher wird dies mit Hilfe der folgenden, ausführlichen Beschreibungen der einzelnen Teilaufgaben:

Funktionsspezifische Datenextraktion

Die funktionsspezifische Datenextraktion hat die Aufgabe, die Informationen aus der primären Wahrnehmung funktionsspezifisch zu selektieren und vor allem zu verdichten, ohne dabei Informationen aus unterschiedlichen Quellen zu fusionieren oder in Beziehung zu setzen. So kann z.B. bei der Nutzung einer Belegungskarte die zu übertragende Datenmenge erheblich reduziert werden, ohne die funktionswichtige Informationen zu verlieren („Wo liegen vor dem EGO belegte Gebiete?“).⁹⁶ Die Repräsentation der Daten und deren Generierung innerhalb der primären Wahrnehmung kann hierdurch von der Situationsanalyse und damit von den individuellen FAS-Funktionszielen entkoppelt werden. Eine solche Extraktion wird beispielsweise bei der in Teil III vorgestellten automatischen Notbremse verwendet. Auch wenn in Tabelle 4.1 der Eindruck entsteht, dass eine funktionsspezifische Extraktion nur im Rahmen dieser Dissertation benutzt wird, so kann davon ausgegangen werden, dass eine solche Selektion wichtiger Szenendaten häufig vorkommt, aber nicht explizit beschrieben wird.

Relationslagebestimmung

Bei der Relationslagebestimmung werden die räumlichen Lagebeziehungen zwischen verschiedenen Objekten ausgewertet und explizit im System repräsentiert („Auf welchem Fahrstreifen befindet sich das EGO?“). Ein Beispiel hierfür ist die Zuordnung von Fahr-

⁹⁶Vgl. Reichel u. a. (2010b) oder auch Bouzouraa (2012)

Veröffentlichung	Extraktion	Relationslageanalyse	Manöverbestimmung	Best. Interaktionsbez.	Det. (Teil-)Situationen	Intentionsabschätzungen	Präd. (Teil-)Situationen	Situationsinterpretation	Rückwirkungsanalyse	Siehe Kapitel 2, <i>Stand der Technik</i>
Pellkofer (2003)		X						X		Seite 12
Meitinger (2009)				X	X	X	X	X		Seite 13 und 15
Sandkühler (2008)			X							Seite 15
Branz (2010)					X		X	X		Seite 16
Nitz (2010)					X			X		Seite 16
Reinisch u. a. (2010)					X		X	X		Seite 16
Stählin (2008)			X				X	X		Seite 17
Isermann u. a. (2010)					X			X		Seite 17
Lulcheva u. a. (2008)		X		X						Seite 19
Hummel u. a. (2008)		X								Seite 20
Vacek u. a. (2007a,b)				X	X				X	Seite 20
Gindele u. a. (2010)			X	X			X			Seite 21
Althoff (2010)						X	X	X	X	Seite 22
Hermann (2010)		X	X	X						Seite 23
Schubert und Wanielik (2010)		X		X				X		Seite 25
Fritsch u. a. (2008)		X						X		Seite 26
Hillenbrand (2007)		X						X		Seite 27
Hülnhagen u. a. (2010)			X		X					Seite 28
Dagli (2005)		X		X	X	X				Seite 28
Frazzoli u. a. (2007)		X						X	X	Seite 30
DuToit u. a. (2008)					X			X		Seite 30
Reichel u. a. (2010b)	X	X		X	X		X	X		

Tabelle 4.1: Übersicht über die in der Literatur behandelten Aufgabengebiete der Situationsanalyse; X = die Autoren stellen explizit Methoden für die entsprechende Teilaufgabe vor oder beschreiben Annahmen, die eine bewusste Beachtung des Teilaspektes aufzeigen.

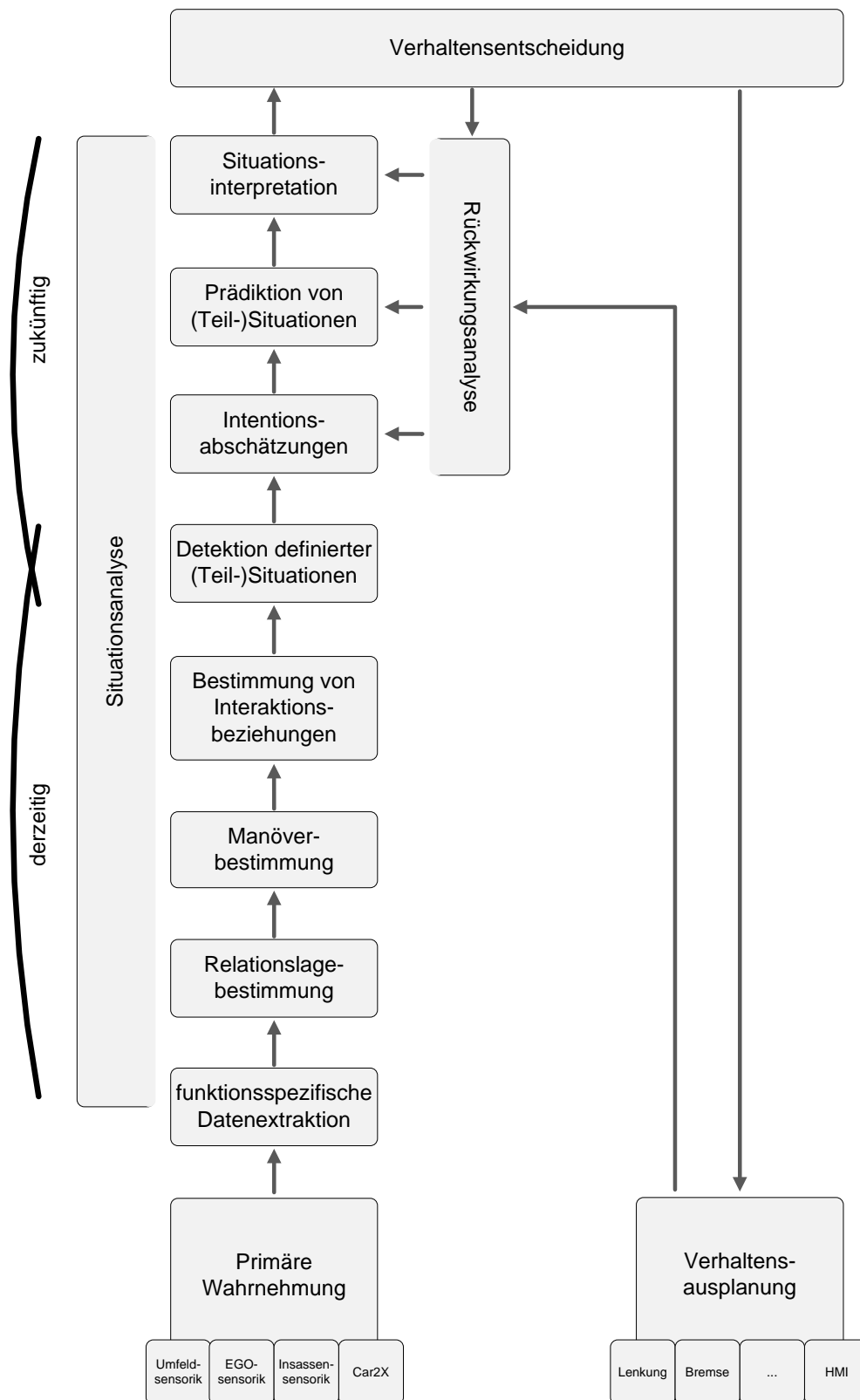


Abbildung 4.6: Detaillierung der funktionalen Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse

zeugen zu Fahrstreifen, wie sie von Hummel u. a. (2008) oder Dagli (2005) beschrieben werden oder die Bestimmung der Lage von Fahrzeugen innerhalb eines Fahrstreifens zueinander bei Pellkofer (2003).

Manöverbestimmung

Bei der Manöverbestimmung wird das derzeitige vom betrachteten dynamischen Objekt vollzogene atomare Manöver bestimmt. Hierbei wird dieses aus Sicht des betrachteten Objektes beschrieben („Fahrzeug 1 fährt an.“). Sandkühler (2008) klassifiziert beispielsweise das Fahrverhalten im Stau (Stillstand, Anfahren, Folgen, Anhalten...). Bei Hülhnagen u. a. (2010) dienen identifizierte „Basiselemente“ wie Bremsen, Langsam Fahren, Abbiegen mit Blinken, Anhalten etc. der Identifikation komplexerer Situationen (Überholen). Ein Manöver wird in diesem Zusammenhang als atomar bezeichnet, wenn es sich nicht sinnvoll weiter in sich zeitlich aneinanderreihende Manöver aufteilen lässt. Obgleich der Begriff eines Manövers zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrttechnik lediglich diejenigen Handlungen bezeichnet, die einen Übergang von einem quasistationären Zustand zu einem anderen herbeiführen, werden im Rahmen dieser Arbeit auch (quasi-)stationäre Zustände als Manöver eingeordnet. Damit ist auch ein *Stillstand* ein Manöver.

Bestimmung von Interaktionsbeziehungen

Die Bestimmung von Interaktionsbeziehungen zielt auf die explizite Beschreibung der zum aktuellen Zeitpunkt bestehenden Beziehungen zwischen zwei Objekten ab, die den Handlungsspielraum mindestens eines der beiden Objekte einschränken („Fahrzeug 2 verhindert einen Fahrstreifenwechsel nach links von Fahrzeug 1“). Hierbei spielen nicht nur Relationslagen und Manöver eine Rolle, sondern auch die in der jeweiligen Domäne gültigen Verkehrsregeln. Ein Beispiel sind die in dieser Arbeit in Kapitel 8.3.1 hergeleiteten Beschränkungen der Ausweichmöglichkeiten bei Autobahnfahrten.⁹⁷ Weitere Beispiele finden sich bei Vacek u. a. (2007a,b), die mittels *cased-based reasoning* Situationen an vorfahrtsbeschränkten Kreuzungen identifizieren, bei Gindele u. a. (2010), die von einer Interaktionsbeachtung zwischen den Verkehrsteilnehmern berichten oder bei Schubert u. a. (2010), die sich mit der Bestimmung von Spurwechselmöglichkeiten eines Fahrzeuges beschäftigen und hierbei die Spurwechseleinschränkungen durch andere Fahrzeuge beachten.

Detektion definierter (Teil-)Situationen

Die Detektion definierter Situationen hat zur Aufgabe, auf die Existenz hochsprachlich bzw. abstrakt überschriebener Situationen zu schlussfolgern, in denen sich ein Bezugsobjekt zum Betrachtungszeitpunkt befindet. Da sich das Bezugsobjekt gleichzeitig in mehreren Situationen wiederfinden kann, steht dieser Punkt auch für die Detektion von Teilsituationen (Einfädelsituation + Rettungsgassenbildung). Branz (2010) spricht diesbezüglich von der Klassifikation von Situationen aus einem Situationskatalog (und einer anschließenden, situationsabhängigen Prädiktion). Ein Beispiel ist das in dieser Arbeit

⁹⁷Vgl. auch die Diplomarbeit von König (2010)

in Teil IV vorgestellte System zur Identifikation von Einfädelsituationen („Befindet sich das EGO in einer Einfädelsituation auf der aufnehmenden Spur?“). Ein weiteres Beispiel findet sich bei Isermann u. a. (2010): Das Fahrzeug muss bestimmen, ob es sich in einer Überholsituation befindet, um ggf. eine entsprechende Überhol-Assistenzfunktion anzubieten.

Intentionsabschätzungen

Die meisten am Straßenverkehr beteiligten dynamischen Objekte können ihren Zustand von sich aus beeinflussen.⁹⁸ Nach dem Modell des menschlichen Entscheidungsprozesses (siehe Kapitel 4.2, Seite 45ff) existieren auf- und abschwellige Motivationstendenzen, die durch eine Intentionsbildung für das Objekt handlungsbestimmend werden.⁹⁹ Die Intentionsabschätzungen haben zur Aufgabe, a priori definierte Motivationstendenzen explizit zu beziffern („Fahrzeug 1 will links abbiegen: Wahrscheinlichkeit x“) und diejenigen zu ermitteln, die das Verhalten des Objektes bestimmen werden. Als Beispiel kann die Arbeit von Dagli (2005) herangezogen werden, der sich mit der Intentionsabschätzung für Einscherer beschäftigt.

Prädiktion von (Teil-)Situationen

Die Prädiktion von (Teil-)Situationen hat die Aufgabe, unter Beachtung der im Vorfeld ermittelten Informationen den Zustand des Systems zu bestimmten Zeitpunkten in der Zukunft zu ermitteln (Wie sieht die dynamische Szene in 2 Sekunden aus?). In der vorliegenden Arbeit werden zum Zwecke der Kollisionsvermeidung mit dynamischen Zielen zum Beispiel die Zustände des EGO und der relevanten anderen Objekte unter Berücksichtigung der Interaktionsbeziehungen voraussimuliert. Ein weiteres Beispiel ist bei Althoff (2010) zu finden, dessen Arbeiten sich ausführlich mit der Prädiktion von komplexen dynamischen Szenarien auseinandersetzen. Stählin (2008) behandelt in seiner Dissertation die manöverspezifische Prädiktion, wobei die entsprechenden Manöver zunächst klassifiziert werden.

Situationsinterpretation

Die Situationsinterpretation beschäftigt sich mit der Bedeutungsfindung der vorliegenden Informationen über die Situation aus Sicht der angestrebten Automatisierung („Ist diese Situation für das EGO gefährlich?“). Hierfür werden bestimmte Kennziffern ermittelt, um die Bedeutung im Rechner abbilden zu können. So benutzten viele Systeme zur Unfallvermeidung Zeit- und/oder Raummaße, um die Kritikalität zu bestimmen (Vgl. Nitz (2010); Stählin (2008); Isermann u. a. (2010); Fritsch u. a. (2008)). An dieser Stelle fließen auch die Einzelinformationen zur eigenen Leistungsfähigkeit zusammen, die über alle Module

⁹⁸Dickmans (1989) spricht hierbei auch von *Subjekten*, um diese von *Objekten* abzugrenzen.

⁹⁹Genau genommen besitzt nicht das Objekt, sondern der jeweilige Fahrzeugführer diese Motivationstendenzen, wobei dies auch ein autonomes oder assistierendes System sein kann. Im eigenen System werden die Intentionen aber als Attribute eines dynamischen Objektes gespeichert. Aus diesem Grund wird hier auch von den Motivationstendenzen eines Objektes gesprochen.

gesammelt werden. Ist die angestrebte Funktion derzeit überhaupt nicht in der Lage, ihre Ziele fehlerfrei umzusetzen, so wird dies an dieser Stelle explizit bekannt. Die Verhaltensentscheidung hat somit die Möglichkeit, ggf. Gegenmaßnahmen einzuleiten bzw. eine Funktion gar nicht erst freizuschalten.

Rückwirkungsanalyse

Bei der Rückwirkungsanalyse handelt es sich um einen rekursiven Pfad, bei der auf der Grundlage (hypothetisch) getroffener Verhaltensentscheidungen und -ausplanungen die Rückwirkungen der eigenen (potentiellen) Handlungen noch einmal in Frage gestellt werden (Wie wirkt sich mein angestrebtes Verhalten auf den Gesamtsystemzustand in X Sekunden aus?). Die von Althoff (2010) vorgestellte, online erfolgende Sicherheitsbewertung einer automatischen Fahrfunktion durch Überprüfung der ermittelten Trajektorie ist eine solche Rückwirkungsanalyse. Von Vacek u. a. (2007a,b) wird dieser rekursive Pfad in der Definition der Situationsanalyse beschrieben:

[...] an analysis of the situation is needed. The analysis consists of an estimation of the situation's development with respect to the selected behavior. (Vgl. Vacek u. a. (2007b), Seite 4271)

Sie benutzen case-based reasoning, was die Abschätzung möglicher Folgesituationen je nach eigenem Handeln erleichtert, da die mögliche Abfolge von verschiedenen Situationen bereits explizit modelliert wird.

4.4 Beispielhafte Anwendung der gefundenen Strukturierung

In den Abbildungen 4.7 sowie 4.8 wird die im vorangehenden Kapitel 4.3 erarbeitete Detaillierung der Aufgaben der Situationsanalyse zum einen auf die hypothetische FAS-Funktion eines Stauassistenten und zum anderen auf die in dieser Dissertation vorgestellte Funktion einer aktiven Gefahrenbremsung angewendet. Bei den Konkretisierungen handelt es sich um Beispiele, die auf eigenen Erfahrungen umgesetzter oder konzipierter Projekte stammen.

Die blau hinterlegten Elemente sind für die jeweiligen Projekte relevant. Neben diesen wird in Stichpunkten beispielhaft umrissen, welche Fragestellungen die Module adressieren. Es wird deutlich, dass nicht notwendigerweise alle Aufgabengebiete behandelt werden müssen, um eine funktionsfähige Fahrerassistenz implementieren zu können. Vielmehr steigt mit zunehmender Ausgestaltung die explizite Darstellung des Wissens über Situationen im Rechner und somit das Potential der FAS-Funktionen situativ(er) zu (re)agieren.

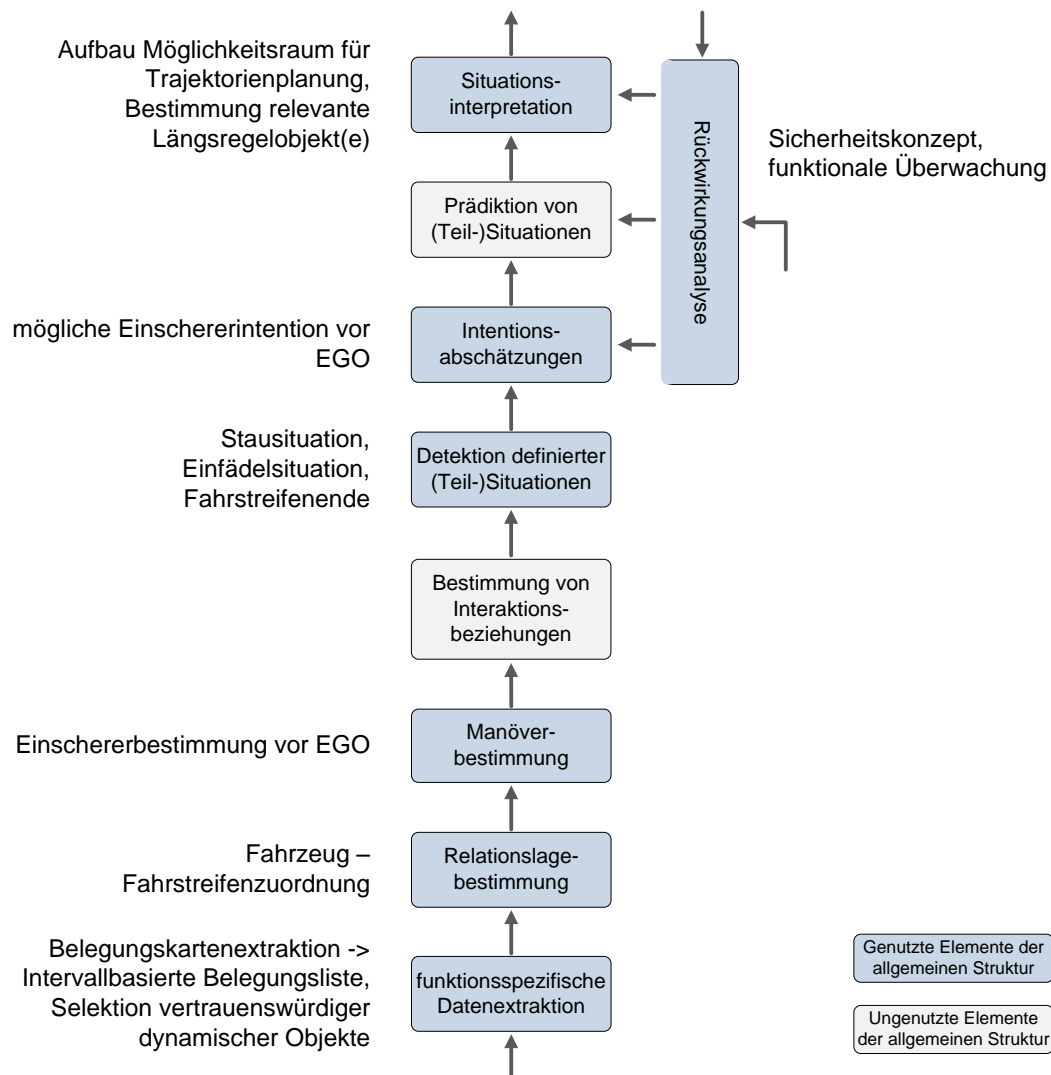


Abbildung 4.7: Anwendung der erarbeiteten Architekturdetaillierung am Beispiel einer Stauassistentz (Automatisierung der Längs- und Querführung im Stau auf Autobahnen)

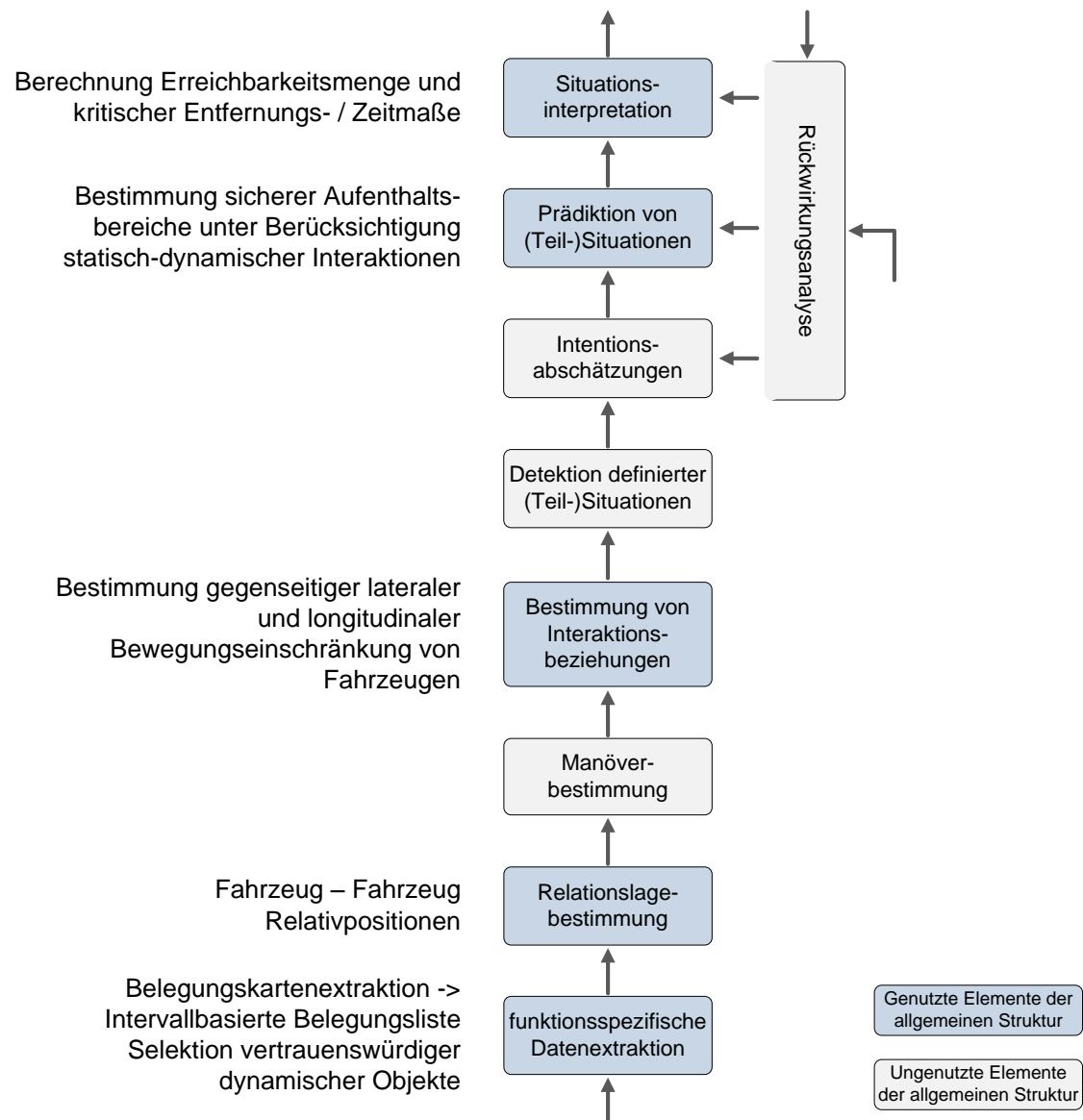


Abbildung 4.8: Anwendung der erarbeiteten Architekturdetaillierung am Beispiel einer aktiven Gefahrenbremsung (möglichst unfallvermeidendes Bremsen in statisch-dynamisch strukturierten Umgebungen, siehe auch Teil III)

Teil III

Situationsanalyse für eine aktive Gefahrenbremsung

5 Gesamtkonzept des Assistenzsystems

In diesem Kapitel wird das Konzept eines Assistenzsystems zur Unfallvermeidung bzw. Unfallschwereminderung dargestellt. Die Forschungsarbeiten waren in das Forschungsprojekt AKTIV-AGB¹⁰⁰ eingebettet, auf dessen Abschlusspräsentation das System im Versuchsträger erfolgreich vorgeführt wurde.¹⁰¹

In Anlehnung an die in Kapitel 3 beschriebenen Aufgaben der Situationsanalyse im Entwicklungsprozess wird zunächst auf die Funktionsdefinition und den angestrebten Nutzen eingegangen, um daraus die relevanten Situationsaspekte abzuleiten. Abschließend werden die maßgeblichen Arbeiten, die bereits in Kapitel 2, *Stand der Technik*, ausführlich besprochen wurden, im Hinblick auf die definierte Funktion reflektiert, um die Methoden und Algorithmen für die Implementation der Situationsanalyse zu erarbeiten.

5.1 Ziele und Nutzen

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Assistenzsystem dient der Vermeidung von Unfällen bzw. der Minderung der Unfallschwere bei Auffahrunfällen im Längsverkehr. Die folgende Auflistung umschreibt die Anforderungen, die an dieses System gestellt werden:

- Ohne den Fahrer zu bevormunden, soll das Assistenzsystem auch bei höheren Geschwindigkeiten (bis ca. 80 km/h) potentiell unfallvermeidend wirken.
- Ein Assistenzeingriff soll kaskadiert mit den Stufen *Warnen*, *Teilverzögerung* und *Vollverzögerung* erfolgen.
- Es sollen alle relevanten dynamischen Objekte und das statische Umfeld berücksichtigt werden (nicht nur ein relevantes Vorderfahrzeug).
- Das statische Umfeld soll beliebig strukturiert sein können.

¹⁰⁰AKTIV-AGB - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr / Teilprojekt Aktive Gefahrenbremsung; gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

¹⁰¹Die Abschlusspräsentation fand vom 23.-25. Juni 2010 in Mendig statt.

- Die Interaktionen zwischen
 - dem EGO und dem statischen Umfeld
 - dem EGO und allen anderen dynamischen Objekten
 - den dynamischen Objekten und dem statischen Umfeld
 - den dynamischen Objekten untereinandersollen explizit modelliert und beachtet werden.
- Das System soll sich an den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers anpassen.
- Das System soll so gestaltet sein, dass Assistenzsysteme zur Ausweichempfehlung bzw. -unterstützung darauf aufbauen können.

Die Einbeziehung sowohl des statischen wie des dynamischen Umfeldes sowie die Beachtung komplexer Interaktionen grenzen die Ansprüche an dieses System von bekannten Serien- bzw. Forschungsständen ab.

Bereits im ersten Punkt wird festgelegt, dass der Fahrer nicht bevormundet werden darf. Diese Nebenbedingung dient nicht nur der Akzeptanzerhöhung, sondern wird im Wesentlichen rechtlich motiviert. Nach den Darstellungen von Seeck und Gasser (2006) darf

ein Eingriff [...] erst zu einer Zeit erfolgen, zu der ein Ausweichen objektiv unmöglich ist, da andernfalls ein Widerspruch zum Willen des Fahrers denkbar ist. (Vgl. Seeck und Gasser (2006)¹⁰²)

Diese juristische Aussage wird hierbei auf die Auslösung eines Bremsvorganges bezogen. Das bedeutet, dass das System vor dem Auslösen einer Bremsung alle möglichen Ausweichmanöver abprüfen muss. Da hier ein kaskadiertes System mit zwei unterschiedlichen Verzögerungsstufen vorliegt, werden bei der Vollbremsung extremere dynamische Randbedingungen für die Ausweichmanöver zugelassen als bei den Untersuchungen für die Teilverzögerung.

Der Fokus der Arbeiten an der aktiven Gefahrenbremsung liegt auf der Erhöhung des Nutzens durch eine möglichst frühe, rechtlich zulässige und kundenseitig akzeptable Bremsung durch das Fahrzeug ohne das Zutun des Fahrers. Daher werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes Funktionsausprägungen nicht berücksichtigt, die den Fahrer bei einer selbst eingeleiteten Notbremsung unterstützen (Bremsassistent).

Die Motivation für die aktive Gefahrenbremse leitet sich aus Studien über den Nutzwert eines solchen Assistenzsystems ab. Zwar sind diese nicht pauschalisierbar, sondern beziehen sich auf die ganz konkret zu Grunde gelegte Assistenzfunktion, allerdings geben sie einen eindeutigen Hinweis darauf, dass eine aktive Gefahrenbremse Unfälle verhindern kann. Als

¹⁰²Die Aussage wurde in dieser Form von Herrn Ass. jur. Gasser auf der Tagung AAET in Braunschweig am 10.2.2010 mündlich bestätigt.

Beispiele für Studien zum Nutzwert seien an dieser Stelle die Arbeiten von Kuehn u. a. (2009) aufgeführt, die das Potenzial Unfälle zu verhindern mit 25,1% angeben. Sie nutzen hierbei Informationen aus verschiedenen Unfalldatenbanken und stellen dem aufgezeichneten Unfallgeschehen theoretisch definierte Assistenzfunktionen gegenüber. Das in der Veröffentlichung vorgestellte *Collision Mitigation Braking System* (CMBS 2) entspricht dabei in etwa dem weiter oben vorgestellten System einer aktiven Gefahrenbremsung. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Gwehenberger u. a. (2008), die von einer möglichen Unfallreduktion von etwa 20% ausgehen.

Entgegen den optimistischen Aussagen ihrer Kollegen gehen Chiellino u. a. (2010) von einer Senkung der Unfallzahlen von lediglich 10% aus. Allerdings betrachten sie nicht das Potenzial einer aktiven Gefahrenbremsung, sondern das eines adaptiven Tempomaten in Verbindung mit einer Kollisionswarnung und einer Notbremsfunktion, wie sie bereits in der Serie zum Einsatz kommen. Für die Autoren ist bewertungsrelevant, dass der Fahrer nach erfolgter Warnung den Unfall noch selbst vermeiden kann. Dies erklärt die pessimistischere Schätzung von Chiellino u. a. (2010), denn eine aktive Gefahrenbremsung stellt die Weiterentwicklung der bereits in Serie erhältlichen Kollisionswarnung mit Notbremsfunktion dar.

5.2 Aufbau des Systems

Beim Versuchsträger handelt es sich um einen AUDI Q7, der im Vergleich zur Serienausstattung mit weiteren Sensoren, zusätzlichen CAN-Bussen und einer modifizierten Bremsansteuerung ausgerüstet wurde. Im Folgenden wird der Aufbau des Versuchsfahrzeuges wie auch des Assistenzsystems entlang der in Abbildung 4.4 in Kapitel 4.2 auf den Seiten 42ff dargestellten Grobstruktur eines FAS knapp beschrieben. Eine ausführlichere Darstellung des Versuchsträgers findet sich im Anhang A auf den Seiten 175ff.

5.2.1 Sensorik und primäre Wahrnehmung

Um den Anforderungen gerecht werden zu können, wurde zum Einen ein Sensorset bestehend aus

- einem Serien-Doppelradar LRR3,
- einem Vorentwicklungs-Laserscanner (eine Ebene, Öffnungswinkel 180°...),
- einer aktiv beleuchteten Innenraumkamera
- sowie einem Vorentwicklungs-Inertialblock

aufgebaut und zum Zweiten eine gitterbasierte Auswertung der Sensorrohdaten¹⁰³ implementiert.¹⁰⁴

Innerhalb der primären Wahrnehmung wurde ein Masterkonzept erarbeitet und implementiert, bei dem verschiedene Expertensysteme verantwortlich für die Wahrnehmung einzelner Aspekte der Umwelt sind.¹⁰⁵ So zeichnet der Kartenmaster¹⁰⁶ verantwortlich für die gitterbasierte Wahrnehmung, der Objektmaster bereitet Daten über dynamische Objekte auf, der EGO-Master¹⁰⁷ schätzt den Zustand des eigenen Fahrzeuges und der Fahrerzustandsmaster den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers.

In den Abbildungen 5.1 bis 5.3 sind die Eingangsdaten für die Situationsanalyse visualisiert. Der Extraktor des Kartenmasters liefert eine intervallbasierte Belegungsliste¹⁰⁸, die den Belegungszustand diskretisiert (*Belegt*, *Unbekannt*, *Frei*), der entlang der Fahrzeuglängsachse Daten aggregiert (ein Streifen ist 0,2 bis 1,0m dick) und nur den relevanten Bereich umfasst. Hierbei kommt es aufgrund der Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges (ca. 50 km/h) zu einer trompetenförmigen Abbildung, deren seitliche Ränder die fahrdynamisch möglichen Grenzen beschreiben¹⁰⁹ (Abbildung 5.1 rechts). Nach vorn wird der Bereich in Abhängigkeit der Geschwindigkeit begrenzt. Informationen über andere Verkehrsteilnehmer erhält die Situationsanalyse listenbasiert. Die in Abbildung 5.2 dargestellte Szene zeigt, dass das serienmäßig verbaute Doppel-Radarsystem LRR3 im dichten Verkehr sogar mehr sieht als der Fahrer. Unter den einzelnen, eingezeichneten IDs sind Zustandsinformationen (*Relativlage*, *Geschwindigkeit* und *Beschleunigung* jeweils in X,Y) sowie Gütewerte gespeichert. Die Fahrerzustandsschätzung liefert eine einfache Klassifikation des Fahrers in *Aufmerksam* bzw. *Unaufmerksam*, die aus der geschätzten Ausrichtung des Kopfes relativ zum Fahrzeug abgeleitet wird (siehe Abb. 5.3). Die Informationen über den Dynamikzustand des EGO sind nicht visualisiert, da lediglich die Werte der *Längsgeschwindigkeit* und der *Gierrate* für die Situationsanalyse von Interesse sind. Daten über den Fahrbahnverlauf oder dessen Gliederung in Fahrstreifen werden von der automatischen Notbremse nicht verwendet - die in den Abbildungen gezeigten Videobilder dienen lediglich der Illustration.

¹⁰³Der Begriff *Rohdaten* beschreibt hierbei Daten, die im Sensorsteuergerät bereits gefiltert und verarbeitet wurden, sich aber in der Fülle und im Abstraktionsgrad noch wesentlich von den in Serienfahrzeugen kommunizierten Daten unterscheiden.

¹⁰⁴Vgl. Bouzouraa (2012)

¹⁰⁵Vgl. Bouzouraa u. a. (2010)

¹⁰⁶Vgl. Bouzouraa (2012); Bouzouraa und Hofmann (2010, 2009)

¹⁰⁷Vgl. Baer u. a. (2009)

¹⁰⁸Eine formale Beschreibung dieser Repräsentationsform findet sich in Kapitel 6 ab Seite 72.

¹⁰⁹Vgl. Schmidt u. a. (2006, 2005)



Abbildung 5.1: Belegungskartenbasierte Eingangsinformation, Mitte: Kamerabild der realen Szene, Links und Rechts: Belegungskarte als Hintergrund mit überlagerter, intervallbasierter Ausgangsschnittstelle

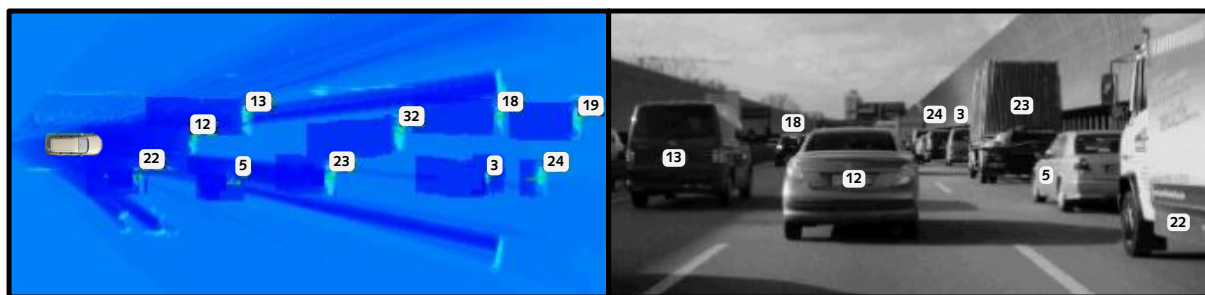


Abbildung 5.2: Eingangsinformationen über dynamische Verkehrsteilnehmer auf Basis eines Radarsensors, Links: In die Ebene projizierte Informationen mit der Belegungskarte als Hintergrund, Rechts: Kamerabild der realen Szene



Abbildung 5.3: Eingangsinformationen über den Fahrerzustand, Links: Aufmerksam klassifiziert, Mitte: Unaufmerksam klassifiziert, Rechts: Grobes Berechnungsschema

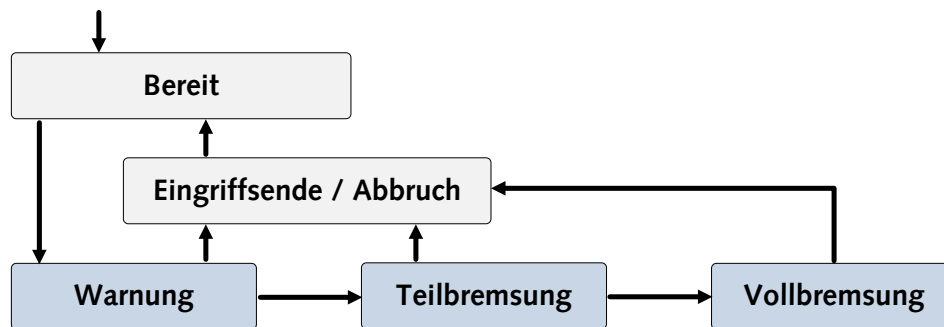


Abbildung 5.4: Zustandsautomat der Verhaltensentscheidung für die aktive Gefahrenbremsung

5.2.2 Verhaltensgenerierung und Aktorik

Auf Seiten der Verhaltensgenerierung¹¹⁰ wird ein Zustandsautomat entsprechend Abbildung 5.4 verwendet. Die kaskadierte Funktionsausprägung mit den Stufen *Warnen*, *Teilbremsen*, *Vollbremsen* ist leicht ablesbar. Der Zustand *Eingriffsende/Abbruch* wurde eingeführt, um ein Oszillieren zwischen den Eingriffszuständen unterbinden zu können.¹¹¹

Ein modifiziertes Bremsensteuergerät ermöglicht die Anforderung von beliebigen Verzögerungswerten sowie einem Bremsruck, der sowohl als Warnruck als auch zur Beschleunigung des Verzögerungsaufbaus eingesetzt werden kann. Des Weiteren stehen die Ausgabe eines Warnongs sowie die Ansteuerung der Warnblinkanlage zur Verfügung. Auf die Nutzung weiterer, serienmäßig verbauter Aktorik wie z.B. Fensterheber wurde im Rahmen der Konzeptdarstellung verzichtet. Die Schnittstelle zwischen der Situationsanalyse und der Verhaltensentscheidung ist in Tabelle 5.1 aufgelistet. Die einzelnen Variablen werden im Folgenden erläutert.

5.3 Relevante Situationsaspekte

Die Verhaltensgenerierung fungiert als Kunde der Situationsanalyse und benötigt von ihr all die Daten, die zur Prüfung der Transitionsbedingungen notwendig sind. Tabelle 5.1 listet die relevanten Situationsaspekte auf. Hierbei handelt es sich um die Analyseergebnisse zur Ausweich-Unmöglichkeit mit den drei Parameterausprägungen *Achtenswert*, *Kritisch* und *Unvermeidbar*, die der Entscheidung zwischen den drei Eingriffsmöglichkeiten *Warnung*, *Teil-* sowie *Vollbremsung* zu Grunde liegen. Weitere für die Verhaltensgenerierung

¹¹⁰Bei dieser Funktion fällt die Verhaltensentscheidung zusammen mit der Verhaltensplanung. Die Zustände des Automaten bestimmen direkt die Signale für die unterlagerten Steuerungen bzw. Regelungen.

¹¹¹Eigentransitionen sind in Abbildung 5.4 der Übersichtlichkeit halber nicht enthalten.

Situationsaspekt	Kennzahl	Datentyp	Einheit
Achtenswert (Warnung)			
Ausweichen unmöglich	a_{Warn}	bool	-
Entfernung bis zur Kollisionskante	d_{Warn}	float	m
Kollisionsobjekt dynamisch	s_{Warn}	bool	-
Geschwindigkeit des Kollisionsobjektes	v_{Warn}	float	$\frac{m}{s}$
Kritisch (Teilverzögerung)			
Ausweichen unmöglich	a_{TV}	bool	-
Entfernung bis zur Kollisionskante	d_{TV}	float	m
Kollisionsobjekt dynamisch	s_{TV}	bool	-
Geschwindigkeit des Kollisionsobjektes	v_{TV}	float	$\frac{m}{s}$
Unvermeidbar (Vollverzögerung)			
Ausweichen unmöglich	a_{VV}	bool	-
Entfernung bis zur Kollisionskante	d_{VV}	float	m
Kollisionsobjekt dynamisch	s_{VV}	bool	-
Geschwindigkeit des Kollisionsobjektes	v_{VV}	float	$\frac{m}{s}$

Tabelle 5.1: Schnittstelle zwischen der Verhaltensentscheidung und der Situationsanalyse und damit relevante Situationsaspekte für die aktive Gefahrenbremsung

wichtige Daten (z.B. Eigengeschwindigkeit, Lenkradwinkel, Lenkradwinkelgeschwindigkeit, Güte der Fahrerbeobachtung etc.) sind für die Verhaltensgenerierung zwar ebenso relevant, werden allerdings durch die primäre Wahrnehmung direkt zur Verfügung gestellt und sind daher in der Tabelle nicht aufgeführt.

Die Anforderung, den Fahrer durch einen Eingriff nicht zu bevormunden, findet sich in den in Tabelle 5.1 definierten Ausgangsdaten wieder. So hat die Situationsanalyse die Aufgabe, die Möglichkeit eines kollisionsfreien Fahrens zu überprüfen. Ist dies nicht gegeben, so soll das boolsche Datum *Ausweichen unmöglich* mit WAHR befüllt werden. Unter der *Entfernung bis zur Kollisionskante* wird dann die Entfernung in Metern zum am weitesten entfernten potentiellen Kollisionsobjekt gespeichert. Die Geschwindigkeit dieses Kollisionsobjektes muss neben einer Klassifizierung zwischen statisch und dynamisch ebenfalls ausgegeben werden. Während aus der ersten Information ablesbar ist, ob ein Eingriff überhaupt erfolgen darf, bestimmen die weiteren Informationen den Eingriffszeitpunkt und dessen Dauer. So kann es zum Beispiel vorkommen, dass das System die Unmöglichkeit des Ausweichens bereits weit vor dem am weitesten entfernten Hindernis

erkennt, aber die Bremsung so gestaltet, dass es kurz vorher zum Stehen kommt. Aus diesem Grund tragen die Situationsaspekte auch adjektivische Namen und werden nicht identisch zur Verhaltensumsetzung bezeichnet (z.B. *Achtenswert* statt *Warnung*).

Für die drei der möglichen Eingriffsstrategien *Warnen*, *Teil-* sowie *Vollbremsung* ist jeweils der identische Satz an Ausgangsdaten vorgesehen. Auch für die Analyse der Frage, ob aus einer Szene ein kollisionsfreier Ausweg existiert, werden innerhalb der Situationsanalyse dieselben Ansätze und Methoden mit unterschiedlichen Randbedingungen genutzt. Im Wesentlichen geschieht diese Anpassung über die Größen Querbesehleunigung und Latenzzeit des Dynamikmodells des EGO. Eine ausführliche Beschreibung dieser Mechanismen und der Parameterwerte ist in Kapitel 6.5 ab Seite 80 zu finden. In der Tabelle 8.1 auf Seite 98 werden die Randbedingungen aufgelistet.

5.4 Szenarienübersicht

Für die Erläuterungen zur Wirkungsweise des Systems und die Ergebnispräsentation wird im Folgenden auf vier Beispielszenarien zurückgegriffen, die in den Abbildungen 5.5 bis 5.8 zu sehen sind. In den Darstellungen wird jeweils ein Bild von der Anfahrt des Szenarios auf dem Testgelände sowie eine abstrakte Darstellung des Testaufbaus gegeben. Grundsätzlich kann die aktive Gefahrenbremsung ihren Mehrwert im Vergleich zu Seriensystemen in einer durch Strukturelemente oder durch andere Fahrzeuge begrenzten Umgebung demonstrieren. Aus diesem Grund wird in allen Beispielen eine Randbebauung simuliert, wie sie zum Beispiel auf Autobahnen häufig anzutreffen ist.

Die Modellierung der Szenarien auf dem Testgelände erfolgte unter dem Gesichtspunkt, mögliche Realszenarien abzubilden, ohne das eigene Fahrzeug und die beteiligten Personen zu gefährden. Grundsätzlich ermöglichen die in dieser Dissertation erarbeiteten Methoden eine Gefahrenbremsung beim Auffahren auf langsam bewegte wie auch statische Hindernisse. Um den Aufbau und den Ablauf der Tests zu vereinfachen, werden in den Szenarien I bis III nur stehende Ziele als Stauende gewählt, wobei anzumerken ist, dass eine Zielbremsung aus hoher Geschwindigkeit auf beliebige statische Hindernisse bereits eine Weiterentwicklung zu Serien- und Forschungssystemen darstellt.¹¹² Im Einzelnen

¹¹²Zudem sind ca. die Hälfte aller Auffahrunfälle in Deutschland mit Personenschaden Kollisionen mit stehenden Hindernissen, Vgl. Bundesamt (2007)

kennzeichnen die Beispielszenarien folgende Merkmale:

Das **Szenario I - „Stauende“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende mit der Möglichkeit nach rechts auszuweichen. Hierbei handelt es sich um den Aufbau, der bei der Abschlusspräsentation des AKTIV-AGB Projektes in Mendig präsentiert wurde. Die Fahrbahn ist nur auf der linken Seite durch Randbebauung abgeschlossen. Auf dieser Seite wird das Stauende auch angefahren. Der Anfahrwinkel sowie der Anfahrfahrstreifen sind ergebnisrelevant. Die Anfahrgeschwindigkeit beträgt $63 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Die Ergebnisse aus diesem Szenario werden einmal als **Szenario Ia** mit einem **aufmerksamen** und einmal als **Szenario Ib** mit einem **unaufmerksamen** Fahrer gezeigt.

Das **Szenario II - „Geschlossene Gasse“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, dass sich in einer Gasse befindet. Auf dem Testgelände wird eine dreispurige Autobahn nachgebildet, bei der alle Fahrstreifen blockiert sind. Links und rechts ist die Fahrbahn von einer statischen Randbebauung eingerahmt. Das Szenario wird auf der linken Seite angefahren, wobei die Erfahrung gezeigt hat, dass der Anfahrfahrstreifen sowie der Einfahrwinkel das Ergebnis nicht beeinflussen.

Das **Szenario III - „Geöffnete Gasse“** zeigt ebenfalls die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, wobei während des Auffahrens noch einige Zeit die Möglichkeit existiert, durch eine Lücke in der Randbebauung nach rechts auszuweichen. Die Modellierung auf dem Testgelände entspricht der aus Szenario II, wobei lediglich zwei Baken auf der rechten Seite entfernt wurden. Im Bild ist dieser Bereich rot umkreist. Auch dieses Szenario wird links angefahren. Im Gegensatz zum vorherigen Szenario sind der Anfahrwinkel sowie der Anfahrfahrstreifen ergebnisrelevant, da die Möglichkeit des Ausweichens zu unterschiedlichen Zeitpunkten wegfällt.

Das **Szenario IV - „Bewegtes Stauende“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, wobei der potentielle Ausweichweg nach rechts durch ein langsam fahrendes Fahrzeug verhindert wird. Auf dem Testgelände hat dieses Fahrzeug eine Anfangsgeschwindigkeit von 30 km/h und verzögert langsam, bis es zwischen den Hindernissen zum Stehen kommt.

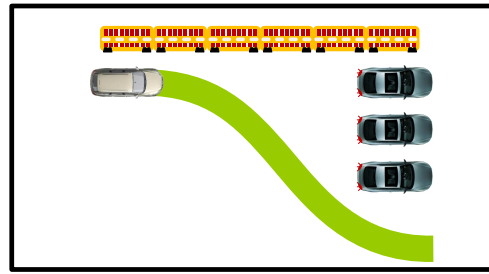


Abbildung 5.5: Szenario I - „Stauende“; Auffahren auf stehendes Stauende in strukturierter Umgebung, Ausweichweg vorhanden

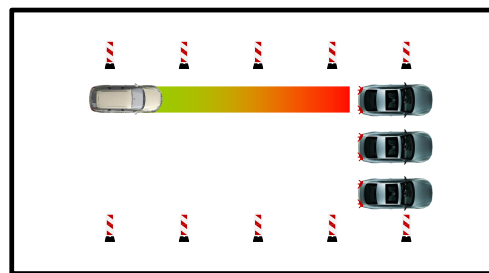


Abbildung 5.6: Szenario II - „Geschlossene Gasse“, Auffahren auf stehendes Stauende in strukturierter Umgebung, Ausweichen unmöglich

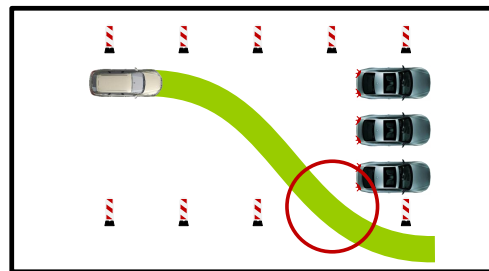
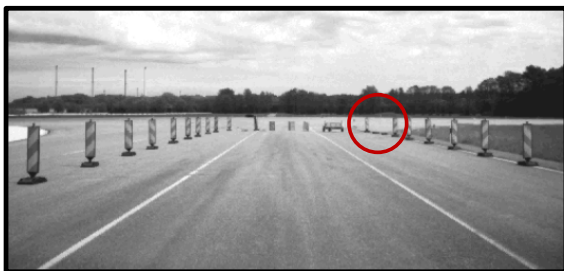


Abbildung 5.7: Szenario III - „Geöffnete Gasse“, Auffahren auf stehendes Stauende in strukturierter Umgebung, Ausweichweg vorhanden

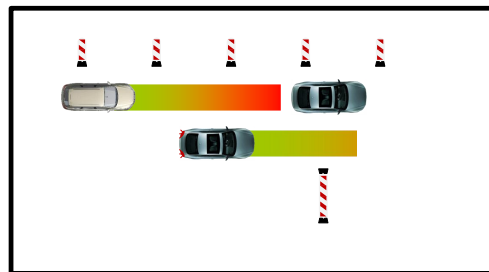


Abbildung 5.8: Szenario IV - „Bewegtes Stauende“; Auffahren auf stehendes Stauende wobei ein dynamisches Objekt das Ausweichen verhindert

Bei allen Szenarien: Links: Dokumentationsbild der Anfahrt auf das Szenario, Rechts: Abstrahiertes Darstellung aus der Vogelperspektive

5.5 Methodenwahl

Die Algorithmen der Situationsanalyse dienen der Überprüfung der Eingriffsvoraussetzungen für einen automatisierten Warn- oder Bremseneingriff. Der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte *CoBRA*-Algorithmus evaluiert die Möglichkeit des Ausweichens in einer beliebig strukturierten Umgebung. *CoBRA*-Algorithmus steht für **C**omputation of **B**oundaries of the **R**eachability **A**rea und umreißt damit die Herangehensweise des Algorithmus, die in Kapitel 8 ausführlich besprochen wird.

Im Folgenden werden zunächst ähnliche, aus der Literatur bekannte Verfahren beschrieben. Aus der großen Masse der vor allem aus der Robotik stammenden Algorithmen werden nur diejenigen vorgestellt, die auch nicht holonome Randbedingungen berücksichtigen können. Hierbei handelt es sich um graphenbasierte Suchalgorithmen, Einzeltrajektorienverfahren und Erreichbarkeitsraumansätze. In der Diskussion werden Vor- und Nachteile erörtert, aus denen sich die Rechtfertigung für die Entwicklung des *CoBRA*-Algorithmus ergeben. Zudem wird deutlich, auf welche Vorarbeiten der *CoBRA*-Algorithmus aufsetzt.

Graphenbasierte Suchalgorithmen

Die grundlegende Arbeit zur graphenbasierten Methodik stellte Dijkstra (1959) mit der Entwicklung des später nach ihm benannten Algorithmus vor. Dieser kann auf der Basis einer topografischen Karte mit kantengewichteten Graphen den kürzesten Weg zwischen einem Start- und einem Endknoten bestimmen. Der Algorithmus ist mit Hilfe von Erweiterungen vielseitig einsetzbar. Ist etwa eine hindernisfreie Bahnplanung auf der Basis einer Belegungskarte gefordert, wird dieser Karte eine zusätzliche Vorschrift zur Erzeugung von Graphenknoten hinterlegt, die die Zulässigkeit der Knoten bei der Bahnplanung beschreibt. Auf Basis der so erzeugten Karte werden vom Algorithmus die Hindernisse umgangen und gleichzeitig wird der kürzeste Weg gesucht. Der Vorteil des Dijkstra Verfahrens ist, dass garantiert jeder Weg und davon der kürzeste Pfad zwischen zwei Knoten gefunden wird. Zudem ist es durch Anpassen der Kantengewichte möglich, zusätzliche Anforderungen an den Weg, wie etwa hindernisfreies Fahren, mit einzubeziehen. Ein Nachteil des Dijkstra Algorithmus ist, dass immer der komplette Graph durchsucht werden muss, um unter allen möglichen Pfaden garantiert den kostengünstigsten zu finden. Des Weiteren müssen für jeden Knoten Matrizen von Vorgängerknoten und die jeweiligen Kosten der Nachfolgeknoten gespeichert werden. Diese Matrizen haben die Dimension $N \times N$, wobei N die Anzahl der Knoten bezeichnet. Bei zunehmender Anzahl von Knoten steigt demnach der Speicherbedarf erheblich an (Vgl. auch Fuhao und Jiping (2009)). Das gleiche Argument trifft auf den A* Algorithmus von Hart u. a. (1968) und die D* Variante von Stentz (1994) zu. Erste Verbesserungen brachten der RBFS* (Recursive Best-First Search), der den Speicherplatzverbrauch linear zur Länge der Lösung beschränkt, sowie MA* (Memory-Bounded A*) und SMA* (Simplified MA*), die jeweils eine fest vorgege-

bene Menge an Speicherplatz benutzen (Vgl. Eckerle und Schuierer (1994)). Bei einem Einsatz für die aktive Gefahrenbremsung besitzen all diese wie auch weitere Varianten der graphenbasierten Algorithmen (Field D* von Ferguson und Stentz (2005), IDA*, IDA*_CR...) einen wesentlichen Nachteil: Es müssen erst alle möglichen Wege gerechnet werden, bevor der Algorithmus die Unausweichlichkeit der Situation erkennt. Hinzu kommt, dass es nicht einen bestimmten Endpunkt gibt, sondern dass theoretisch unendlich viele Flucht-Endpunkte existieren, die auf dem Rand des Aufmerksamkeitsbereiches liegen (siehe Abbildung 6.5, Seite 78).

Einzeltrajektorienverfahren

Bei den Einzeltrajektorienverfahren werden mit Hilfe eines Fahrzeugmodells Trajektorien gerechnet und anschließend einzeln auf mögliche Kollisionen überprüft. Ein nennenswerter Vertreter ist der für die Bahnplanung gedachte DAMN (Distributed Algorithm for Mobile Navigation) von Rosenblatt (1997). Über einen Voting-Mechanismus wird hierbei die für diesen Zeitpunkt optimale Trajektorie gesucht, wobei auch gegen eine Trajektorie gestimmt werden kann, wenn diese beispielsweise zu einer Kollision führen würde. Zwei direkte Verfahren für eine automatische Notbremse stellen Kopischke (2000) bzw. Karrenberg (2008) in ihren Dissertationen vor. Beide überprüfen Ausweich- und Brems-trajektorien auf die Möglichkeit, mit Ihnen die Situation unfallfrei zu verlassen. Karrenberg definiert in diesem Zusammenhang sogenannten *Stellvertretertrajektorien*. Lauer und Botsch (2010) beschäftigen sich in ihrem Artikel mit der Vereinfachung und Komplexitätsreduktion eines Einzeltrajektorienansatzes. Die Vorteile solcher Ansätze sind deren Determinismus und Interpretierbarkeit sowie die einfache Berücksichtigung weiterer dynamischer Verkehrsteilnehmer in der Analyse. Gerade Letzteres ist wichtig hinsichtlich potentieller rechtlicher Auseinandersetzungen nach der Serieneinführung. Allerdings muss auch bei diesen Verfahren erst jede Trajektorie überprüft werden, bevor die Unausweichlichkeit einer Situation erkannt wird. Zudem spielen die Anzahl und Form der untersuchten Einzeltrajektorien eine wesentliche Rolle für die Vermeidung von Fehlauflösungen. Während bei der Untersuchung von Kollisionen mit dem als relevant definierten Führungsfahrzeug sicher alle Trajektorien abgedeckt werden können, gestaltet sich dies im Beispielszenario III - „Geöffnete Gasse“ von Seite 67 schwierig. In Abbildung 5.9 ist ein Beispiel dargestellt, bei dem eine große Menge an Trajektorien definiert sein muss, um alle weit entfernten Fluchtmöglichkeiten abdecken zu können. Dies ist vor allem der langen Anfahrt und der engen Lücke geschuldet - aber kein Rechtfertigungsgrund für eine Fehlauflösung.

Mit dem dargestellten Szenario hat der RRTs-Algorithmus (Rapidly-exploring Random-Trees) von Lavalley (1998) weniger Schwierigkeiten. Ausgehend von einem Startpunkt S baut dieser unter Beachtung einer Expansionsvorschrift in zufällige Richtungen einen Suchbaum auf. Anschließend wählt er erneut einen zufälligen Punkt R , zu dem der Baum ausgedehnt wird. Ansatzpunkt der Ausdehnung ist dabei jeweils der dem Punkt R nächst-

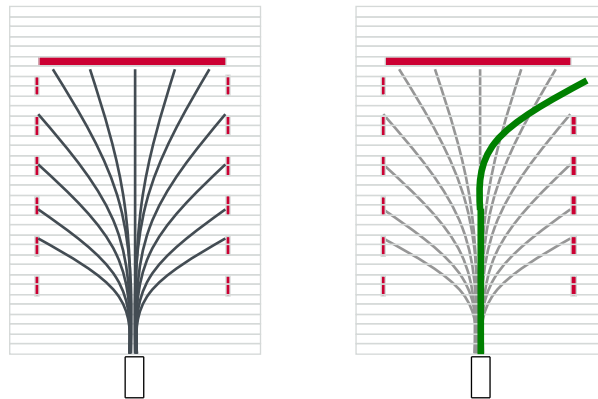


Abbildung 5.9: Dilemma der Einzeltrajektorienverfahren am Beispiel des Szenario III - “Geöffnete Gasse” aus den Beispielszenarien in Kapitel 5.4 auf den Seiten 65ff

liegende Punkt N des Baumes. Stößt die Expansion auf ein Hindernis, so werden die beteiligten Zweige gelöscht und die Suche wird an einem anderen, offenen Knoten fortgesetzt. Die Methode eignet sich besonders, um schnell hochdimensionale Räume zu durchsuchen. Mit der Expansionsvorschrift können die nicht holonomen Randbedingungen in die Exploration eingebracht werden. Eine große Schwachstelle ist, dass ein existierender Pfad nicht notwendigerweise gefunden werden muss. Aufgrund des willkürlichen Wachstums ist zudem die benötigte Rechenzeit nicht abzuschätzen.

Erreichbarkeitsraumansätze

Einen stochastischen Ansatz zur Berechnung einer Erreichbarkeitsmenge liefert Althoff (2010). Für eine ausführlichere Besprechung seiner Arbeiten sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.1.7, Seite 22 verwiesen. Sie bestehen durch ihre mathematisch sauber formulierten Grundlagen und die Anschaulichkeit der Ergebnisse. Zudem wurden sie bereits zur Online-Verifikation einer autonom geplanten Trajektorie eingesetzt. Leider sind die Verarbeitungszeiten von 100 bis 150ms¹¹³ selbst für diese eine Trajektorie nicht echtzeitfähig. Der Autor selbst kommt zu dem Schluss, dass seine auf Markov-Ketten basierenden Methoden die Interaktion zwischen Fahrzeugen schwer abbilden können und zudem im unstrukturierten Gelände vergleichsweise unflexibel sind.

Einen weiteren Ansatz zur Berechnung einer Erreichbarkeitsmenge stellen Schmidt u. a. (2005, 2006) vor¹¹⁴. Ziel ihrer Forschungen ist das Bestimmen der letztmöglichen Trajektorie für ein Ausweichmanöver um ein Hindernis. Hierfür entwickeln die Autoren die Idee

¹¹³Basierend auf der Nutzung eines Systems, wie es in Goebel und Färber (2007) beschrieben ist

¹¹⁴An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Forschungsarbeiten dem „Projekthaus FAS“ der Audi AG in Ingolstadt entstammen. Dort wurde auch die hier vorliegende Dissertation entwickelt.

von Aufenthaltsgebieten, die eine Übermenge sämtlicher fahrbarer Trajektorien darstellen. Über den Rand dieser Gebiete schlussfolgern sie auf die letztmögliche Ausweichtrajektorie. Bei der schrittweisen Prädiktion wird jeweils nur der Rand des Gebietes vorausberechnet, alle Punkte innerhalb des geschlossenen Randes können im Anschluss als kollisionsfrei erreichbar definiert werden. Sollte kein Punkt auf dem Rand kollisionsfrei präzifizierbar sein, so ist ein Ausweichen innerhalb des betrachteten Zeithorizontes nicht möglich. Der große Vorteil eines solchen Vorgehens liegt in der Reduzierung des Rechenaufwandes: Je näher das unumfahrbare Hindernis und damit je kleiner die Erreichbarkeitsmenge, desto kürzer ist die Verarbeitungszeit und umso schneller kann eine automatische Assistenz erfolgen. Des Weiteren zeigen erste Auswertungen durch die Autoren, dass auch beliebig strukturierte Lücken sicher als Ausweichmöglichkeit identifiziert werden. Aus diesem Grund basiert der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte *CoBRA*-Algorithmus auf den Grundgedanken von Schmidt u. a. (2005, 2006) und erweitert bzw. modifiziert diese um folgende Elemente:

- Die Anwendung auf eine Intervallbasierte Umgebungsrepräsentation, wie sie im Kapitel 6.2 vorgestellt wird, und im Zuge dessen auch eine raum- und nicht zeitbasierte Diskretisierung
- Die Verwendung eines gekrümmten Bahnmodells für die Prädiktion der Grenzen
- Die Berücksichtigung des Aufmerksamkeitszustandes des Fahrers
- Die Berücksichtigung von sicheren Aufenthaltsgebieten anderer dynamischer Verkehrsteilnehmer
- Die Berücksichtigung von Interaktionen zwischen allen Verkehrsteilnehmern sowohl untereinander als auch mit dem statischen Umfeld

Die Abkürzung *CoBRA* steht hierbei für **C**omputation of **B**oundaries of the **R**eachability **A**rea und steht für die alleinige Betrachtung der Grenzen des kollisionsfrei erreichbaren Raumes. Alle Punkte innerhalb dieser Grenzen können als erreichbar klassifiziert werden, ohne konkrete Trajektorien zu kennen, die diese mit dem Startpunkt verbinden.

6 Definitionen und Modelle

Nach einer Darstellung der genutzten Koordinatensysteme werden in den Abschnitten 6.2 bis 6.7 die verwendeten Modelle beschrieben. Grundlage der internen Repräsentation der Daten ist die intervallbasierte Umfelddarstellung, die zunächst vorgestellt wird. Es folgen die Definitionen der Erreichbarkeitsmenge, deren Rand sowie deren Abgeschlossenheit im Abschnitt 6.3. Der Abschnitt 6.4 beschreibt das Bewegungsmodell, das allen dynamischen Objekten zu Grunde gelegt wird und somit auch die Basis des *CoBRA*-Algorithmus ist. Die konkrete Ausgestaltung des Bewegungsmodells steht im Mittelpunkt der Abschnitte 6.5 und 6.6, wobei das Hauptaugenmerk auf die Modellierung der Normalbeschleunigung auf Basis von Versuchsdaten gelegt wird. Am Ende des Kapitels werden in Abschnitt 6.7 die verwendeten Formmodelle erläutert.

6.1 Koordinatensysteme

Die in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensysteme sind in Abbildung 6.1 zu sehen und basieren auf der Norm DIN 70000. Am häufigsten Verwendung findet das Fahrzeugkoordinatensystem. Es hat seinen Ursprung auf der Mitte der Hinterachse auf dem Boden und weist mit der X-Achse entlang der Fahrzeuglängsachse nach vorn. Die Y-Achse weist zur linken Seite positive Werte auf, so dass mit einer rechtshändigen Orientierung die Z-Achse nach oben zeigt. Auch alle anderen Koordinatensysteme sind rechtshändig orientiert. Das Globale Koordinatensystem wird meist zu Start der Anwendung festgelegt und dient als ortsfester, globaler Bezug. Im individuellen Sensorkoordinatensystem liefern die einzelne Sensoren ihre Daten. Im Zuge der Datenverarbeitung innerhalb des Architekturblocks „Primäre Wahrnehmung,“ (siehe Kapitel 4, Seiten 40ff) werden diese bereits in das Fahrzeugkoordinatensystem umgerechnet, um Daten mehrerer Quellen im gleichen System repräsentieren zu können. Alle Koordinatensysteme in dieser Dissertation ohne weitere Angaben beziehen sich auf das Fahrzeugkoordinatensystem.

6.2 Intervallbasierte Umfeldrepräsentation

Die intervallbasierte Umfeldrepräsentation ist sowohl die Beschreibungsform für Eingangsdaten der Situationsanalyse als auch deren interne Datenstruktur. Hierbei handelt es sich

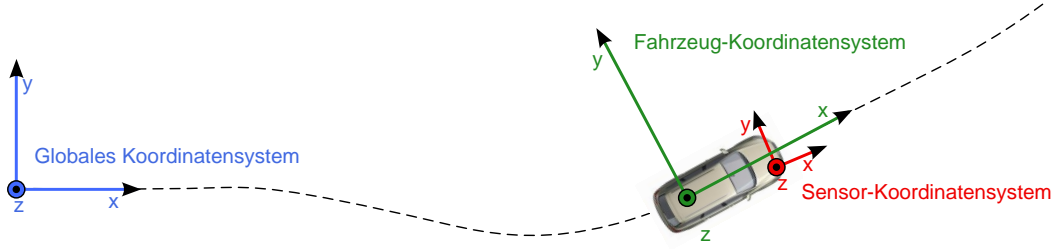


Abbildung 6.1: Genutzte Koordinatensysteme (alle rechtshändig orientiert), Blau: Meist zum Startzeitpunkt festgelegtes globales Koordinatensystem, Grün: Fahrzeugkoordinatensystem mit dem Bezugspunkt Mitte Hinterachse auf dem Boden, Rot: Beispielhaftes Sensorkoordinatensystem; Alle Koordinatensysteme in dieser Dissertation ohne weitere Angaben beziehen sich auf das Fahrzeugkoordinatensystem.

um eine in Fahrzeugintrichtung diskretisierte Darstellungsform in Streifen. Innerhalb der Streifen B_n werden einzelne Abschnitte durch Attribute Ω (z.B. Belegt, Frei) beschrieben. In Abbildung 6.2 ist ein Beispiel aus einer Autobahnfahrt für die intervallbasierte Beschreibung des Belegungszustandes gegeben. Die folgenden Ausführungen dienen der mathematischen Beschreibung dieser Repräsentationsform.

Mit Hilfe der intervallbasierten Repräsentation wird der abgebildete Raum B wie folgt definiert:

$$B := \bigcup_{n=1}^N B_n \quad (6.1)$$

Er setzt sich aus N diskreten Streifen B_n mit

$$B_n := \bigcup_{m=1}^{M_n} B_{n,m} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{array}{l} x_{n-1} \leq x < x_n \\ y_{n,min} \leq y < y_{n,max} \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

zusammen. Der gesamte Raum B wird somit zunächst entlang der X-Achse in einzelne Streifen B_n unterteilt, die alle Punkte (x, y) zwischen x_{n-1} ; x_n ; $y_{n,min}$ und $y_{n,max}$ umfassen. Jeder Streifen B_n ist wiederum in M_n Abschnitte $B_{n,m}$ entlang der y-Achse unterteilt, wobei die jeweilige linke Grenze $\lambda_{n,m}$ sowie die jeweilige rechte Grenze $\rho_{n,m}$ eines Abschnittes kontinuierliche Werte annehmen können.

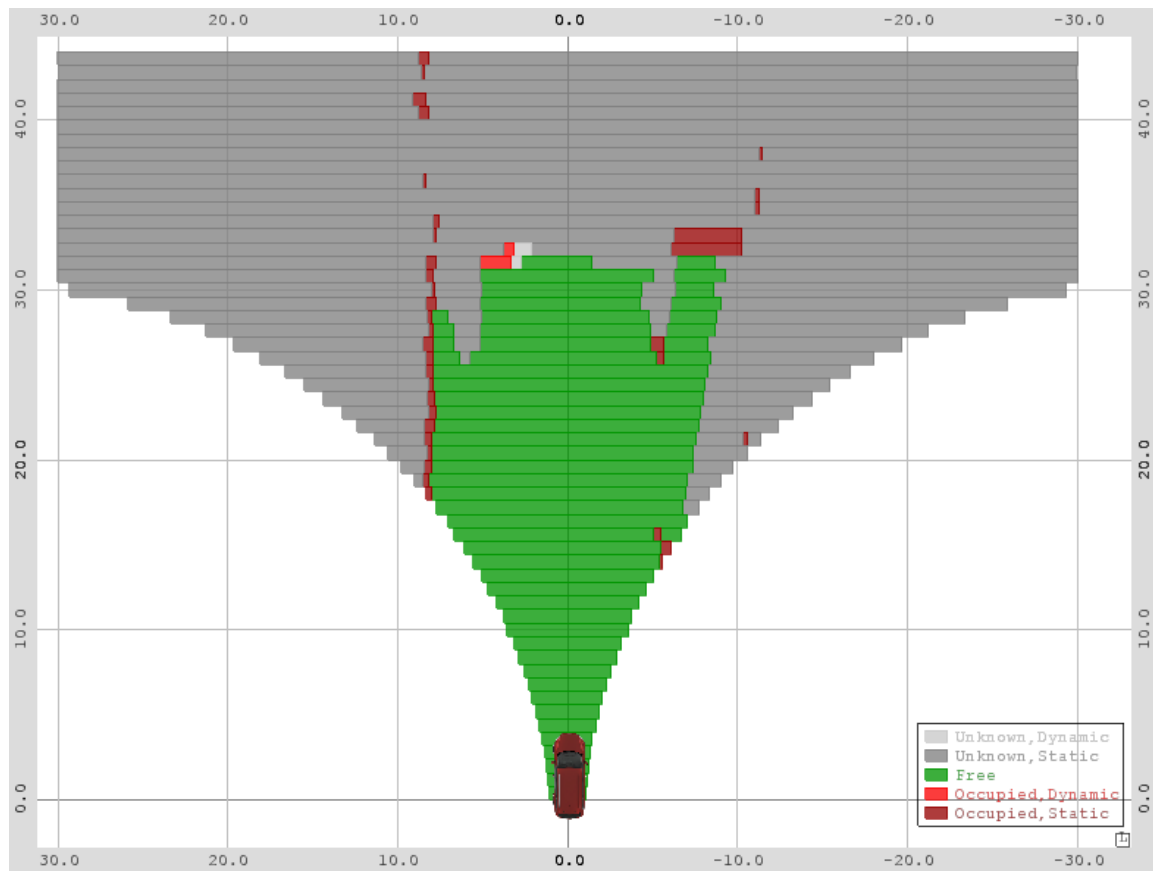


Abbildung 6.2: Oben: Beispiel einer intervallbasierten Umfeldrepräsentation zur Beschreibung der Belegungszustände vor dem Fahrzeug, Unten: Dokumentationsvideo

$$B_{n,m} := \left\{ (x, y, \omega) \left| \begin{array}{l} x_{n-1} \leq x < x_n \\ \rho_{n,m} \leq x < \lambda_{n,m} \\ \omega \in \Omega \end{array} \right. \right\} \quad (6.3)$$

Jedem dieser Abschnitte kann nun eine Menge an Attributen ω zugewiesen werden, die diesen Raumabschnitt näher bestimmen. Abbildung 6.3 zeigt im oberen Teil die kartenbasierten Eingangsdaten der Situationsanalyse: einen Streifen der intervallbasierten Belegungsliste. In diesem Fall können den Abschnitten die Attribute Ω mit

$$\Omega := \{frei, unbekannt, belegt\} \times \{dynamisch, statisch\} \quad (6.4)$$

zugeordnet werden. Zudem sind die einzelnen Abschnitte $B_{n,m}$ so angeordnet, dass sie einen Streifen B_n vollständig ausfüllen; es existieren also keine Lücken zwischen den einzelnen Abschnitten $B_{n,m}$. Das gleiche gilt auch für die Streifen B_n , womit der gesamte Raum B in der intervallbasierten Belegungsliste lückenlos beschrieben wird.

Die Interpretation der Daten wird bestimmt durch die Funktionsausprägung. Grundsätzlich kann man hierbei zwischen intervenierenden und führenden Systemen unterscheiden. Bei einer intervenierenden Funktion wie der aktiven Gefahrenbremsung, die kurzzeitig zur Abwendung immanenter Gefahren zum Einsatz kommt, steht die Vermeidung von Falschauslösungen im Vordergrund. Aus diesem Grund werden bei diesen *unbekannte* Bereiche der Belegungskarte als *frei* angenommen, was in Abb. 6.3 zu sehen ist. Bei führenden Systemen, die die Fahrzeugführung zeitweilig ganz oder teilweise übernehmen, muss *unbekannt* als *belegt* interpretiert werden, um auszuschließen, dass das Fahrzeug nicht automatisiert gegen ein eventuell (noch) nicht wahrgenommenes Hindernis lenkt. Des Weiteren ist anzumerken, dass das Attribut *belegt* für *dynamische* Abschnitte nur für den Zeitpunkt der funktionsspezifischen Extraktion der Daten aus einer Belegungskarte gilt. Über diesen Zeitpunkt hinaus werden die dynamischen Abschnitte im Rahmen der Situationsanalyse mit Hilfe des *CoBRA*-Algorithmus prädiziert und in sogenannten sicheren Aufenthaltsgebieten gespeichert.

6.3 Definitionen zur Erreichbarkeitsmenge

Auch innerhalb der Situationsanalyse wird die intervallbasierte Repräsentation genutzt. Sie bildet die Grundlage des *CoBRA*-Algorithmus zur Berechnung all derjenigen Gebiete, die kollisionsfrei erreichbar sind. In Abbildung 6.3 ist im unteren Teil ein Streifen dieser intervallbasierten Erreichbarkeitsmenge dargestellt. Den Abschnitten $R_{n,m}$ dieser Menge

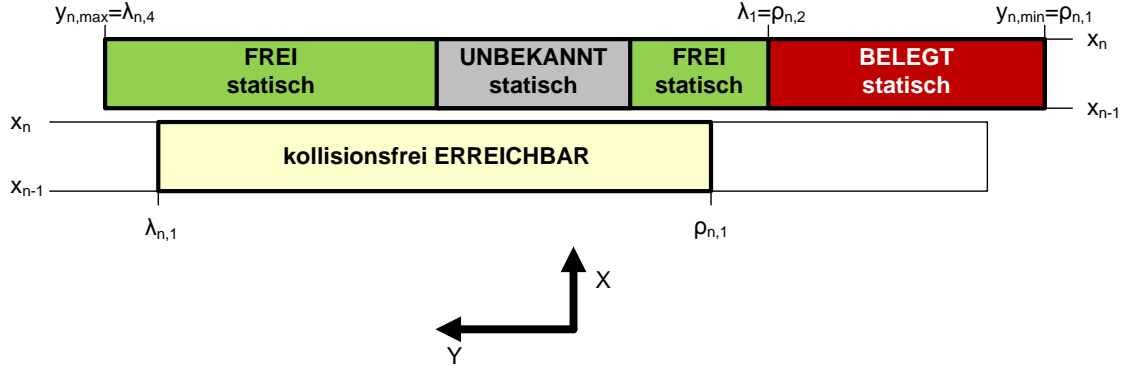


Abbildung 6.3: Intervallbasierte Repräsentationen, Oben: Intervallbasierte Belegungsliste, Unten: Intervallbasierte Erreichbarkeitsmenge

$$R := \bigcup_{n=1}^N R_n = \bigcup_{n=1}^N \bigcup_{m=1}^{M_n} R_{n,m} \quad (6.5)$$

kann nur das Attribut Ω mit

$$\Omega := \{\textit{kollisionsfrei erreichbar}\} \quad (6.6)$$

zugewiesen werden, sodass alle beschriebenen Abschnitte automatisch auch den kollisionsfrei erreichbaren Raum definieren. Somit sind die Abschnitte selbst auch nicht notwendigerweise zusammenhängend.

Bei der intervallbasierten Erreichbarkeitsmenge R handelt es sich um die Darstellung aller *Bezugspunkte* des betrachteten Fahrzeuges im Raum, die dieses ohne eine Kollision auf dem Weg zwischen seinem Startpunkt und einem beliebigen Punkt der Menge B unter den gegebenen dynamischen Bedingungen erreichen kann. Der *CoBRA*-Algorithmus beachtet bei der Berechnung zwar die gesamte Fahrzeugausdehnung, die beigen Bereiche in den Ergebnisgrafiken stellen allerdings lediglich die Bezugspunkte dar. Zum besseren Verständnis sind in Abbildung 6.4 einige Beispiele der theoretisch unendlich möglichen Vielfalt aufgeschlüsselt. Hierbei liegt der Bezugspunkt auf dem vordersten mittleren Punkt des Fahrzeuges. Das Auto Nr. ① kann bis zu dem von Baken versperrten Gebiet fahren. Auto Nr. ② fährt links vorbei. Hier zeigt sich auch, warum die Erreichbarkeitsmenge seitlich nicht bis an den belegten (roten) Abschnitt heranreicht: Das Fahrzeug muss in seinen Ausmaßen kollisionsfrei daran vorbeifahren können.

Hat der *CoBRA*-Algorithmus die Erreichbarkeitsmenge für das EGO bestimmt, so stellt sich die Frage, ob der Fahrer sich kollisionsfrei durch die gegebene Situation bewegen kann. Hierzu wird R verglichen mit der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge

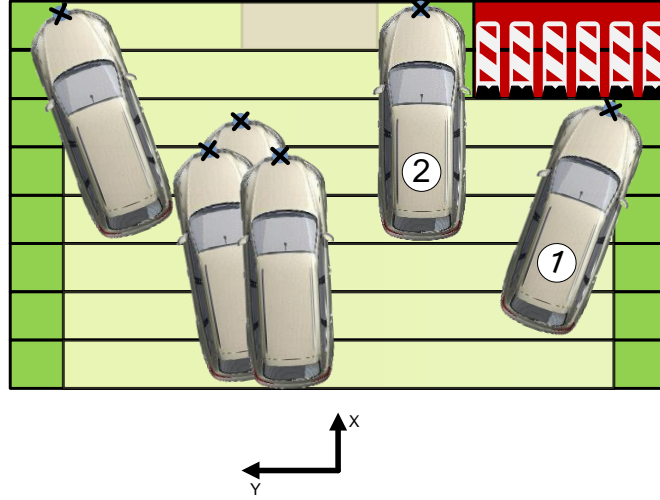


Abbildung 6.4: Erreichbarkeitsmenge mit beispielhaften Fahrzeugpositionen. Die Kreuze am jeweils vordersten mittleren Punkt der Fahrzeuge symbolisieren deren Bezugspunkte.

\hat{R} , genauer gesagt mit dem Rand $\delta\hat{R}$ dieser Menge, der sich definitionsgemäß aus der Differenzmenge zwischen Abschluss \hat{R}_n° und Innerem $\tilde{\hat{R}}$ ergibt:

$$\delta\hat{R} = \tilde{\hat{R}} \setminus \hat{R}^\circ. \quad (6.7)$$

Die maximal mögliche Erreichbarkeitsmenge \hat{R} , mit

$$\hat{R} := \bigcup_{n=1}^N \hat{R}_n \quad (6.8)$$

enthält dabei in jedem Streifen \hat{R}_n nur einen Abschnitt, der diesen vollständig ausfüllt

$$\hat{R}_n := \hat{R}_{n,1} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \left| \begin{array}{l} x_{n-1} \leq x < x_n \\ y_{n,min} \leq y < y_{n,max} \end{array} \right. \right\}. \quad (6.9)$$

Liegt kein Punkt der berechneten Erreichbarkeitsmenge R auf dem Rand $\delta\hat{R}$

$$R \cap \delta\hat{R} = \emptyset, \quad (6.10)$$

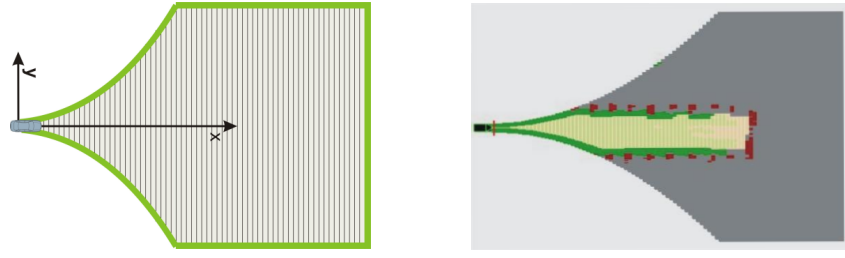


Abbildung 6.5: Erreichbarkeitsmenge, Links: Maximale Menge \hat{R} und deren Rand $\delta\hat{R}_n$, Rechts: Beispiel einer abgeschlossenen Situation $R \cap \delta\hat{R}_n = \emptyset$ anhand des in Abschnitt 5.6 auf Seite 67 beschriebenen Szenario II - „Geschlossene Gasse“

dann gilt die Situation als abgeschlossen und eine Voraussetzung für den Eingriff der aktiven Gefahrenbremsung ist erfüllt. In der Abbildung 6.5 ist rechts ein Beispiel für eine solche abgeschlossene Situation dargestellt (siehe Beispielszenario II - „Geschlossene Gasse“ auf Seite 67). Links ist die maximale Menge \hat{R}_n zu sehen, wobei deren Rand $\delta\hat{R}_n$ farblich hervorgehoben ist.

6.4 Bewegungsmodell für die Prädiktion

Für die Prädiktion dynamischer Objekte - hierzu zählt auch das EGO - wird das gekrümmte Bahnmodell genutzt, wie es von Rong Li (2002) in seiner Übersicht über verschiedene Dynamikmodelle beschrieben wird:¹¹⁵

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos \varphi(t) \quad (6.11)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin \varphi(t) \quad (6.12)$$

$$\dot{v}(t) = a^t(t) \quad (6.13)$$

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{a^n(t)}{v(t)}. \quad (6.14)$$

Hierbei bezeichnen $x(t)$ und $y(t)$ Positionen im kartesischen Koordinatensystem, $v(t)$ die Geschwindigkeit über Grund, $\varphi(t)$ die Ausrichtung des Geschwindigkeitsvektors, $a^t(t)$ die Beschleunigung in tangentialer und $a^n(t)$ die Beschleunigung in normaler Richtung. In der Abbildung 6.6 wird das gekrümmte Bahnmodell visualisiert.

¹¹⁵Im Vorfeld wurde dieses Modell mit einem einfacheren linearen Modell verglichen. Die Ergebnisse des Vergleiches sowie weitere Angaben finden sich im Anhang C bzw. in der von mir betreuten Arbeit von Fischer (2010)

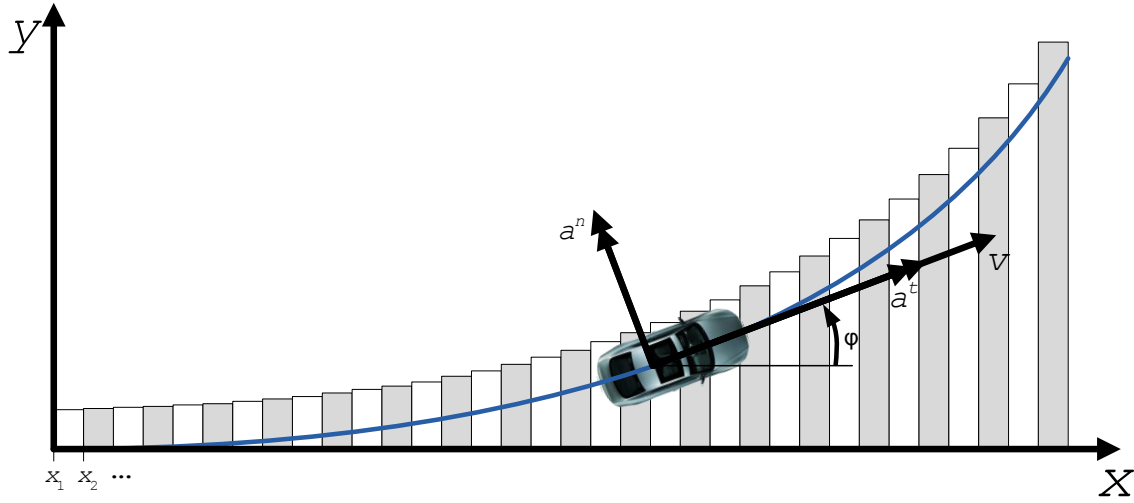


Abbildung 6.6: Gekrümmtes Bahnmodell

Für die Diskretisierung der Gleichungen 6.11 bis 6.14 wird angenommen, dass die Änderung der Geschwindigkeit $\dot{v}(t)$ über ein Zeitintervall T_k wesentlich kleiner ist als die Geschwindigkeit selbst und dass die Änderungen der Beschleunigungen $\dot{a}^t(t)$ sowie $\dot{a}^n(t)$ und die Änderung der Ausrichtung $\dot{\varphi}(t)$ über das Zeitintervall T_k vernachlässigbar gering sind. Dies führt auf

$$x_{k+1} = x_k + v_k T_k \cos \varphi_k + \frac{a_k^t}{2} T_k^2 \cos \varphi_k \quad (6.15)$$

$$y_{k+1} = y_k + v_k T_k \sin \varphi_k + \frac{a_k^t}{2} T_k^2 \sin \varphi_k \quad (6.16)$$

$$v_{k+1} = v_k + a_k^t T_k \quad (6.17)$$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{a_k^n}{v_k} T_k. \quad (6.18)$$

Die Berechnungen durch den *CoBRA*-Algorithmus erfolgen nicht auf Basis konstanter Zeitschritte, sondern knüpfen an die durch die Extraktion der Daten der Belegungskarte existierende Diskretisierung entlang der Fahrzeuglängsachse an. Hierdurch ergibt sich der jeweilige Wert des Zeitintervalls T_{k+1} mit

$$T_{k+1} = \frac{-v_k \cos \varphi_k + \sqrt{v_k^2 \cos^2 \varphi_k + \frac{a_k^t}{2} \cos \varphi_k (x_{k+1} - x_k)}}{a_k^t \cos \varphi_k}, \quad (6.19)$$

wobei berücksichtigt wurde, dass x monoton wächst ($x_{k+1} > x_k$). Für den Fall, dass $a^t = \text{const} = 0$ ist, vereinfacht sich diese Gleichung auf

$$T_{k+1} = \frac{x_{k+1} - x_k}{v_k \cos \varphi_k}. \quad (6.20)$$

In der Abbildung 6.6 ist die Diskretisierung des Modells entlang der X-Achse ebenfalls erkennbar.

6.5 Modellierung der Eigenbewegung

Aus den Gleichungen 6.11 bis 6.14 ist ersichtlich, dass die Einflussfaktoren auf die Trajektorie die Verläufe der Beschleunigungen in tangentialer $a^t(t)$ bzw. in normaler Richtung $a^n(t)$ und die Startwerte $x(0)$, $y(0)$, $\varphi(0)$, $v(0)$ sowie $\dot{\varphi}(0)$ sind. Da die Extraktion die Daten grundsätzlich EGO-zentriert beschreibt, ergibt sich die Ausgangsposition sowie die Startausrichtung zu $x(0) = y(0) = \varphi(0) = 0$. Die Werte der Geschwindigkeit über Grund und der Giergeschwindigkeit werden aus Messdaten $v(0) = v_{\text{mess}}(0)$, $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_{\text{mess}}(t)$ abgeleitet.

Von zentraler Bedeutung ist der Verlauf der beiden Beschleunigungen $a^t(t)$ und $a^n(t)$, da diese den Versatz δy_k in der Entfernung x_k bestimmen und damit ein eventuell notwendiges Ausweichen erst ermöglichen. Für die tangentielle Beschleunigung wird die einfache Annahme $a^t(t) = 0$ getroffen. Der Verlauf der Normalbeschleunigung soll genauer modelliert werden. Für die Messung existiert ein standardisiertes Verfahren nach ISO 7401. Hierbei wird

bei einer vorgegebenen Fahrgeschwindigkeit das Lenkrad möglichst schnell auf einen solch großen Wert $\delta_{L_{\text{stat}}}$ bewegt, so dass eine bestimmte stationäre Querbeschleunigung \ddot{y}_{stat} erzielt wird. (Vgl. Mitschke und Wallentowitz (2004))

Die Abbildung 6.7 zeigt Ergebnisse entsprechender experimenteller Studien, wie sie von Mitschke und Wallentowitz (2004) publiziert wurden. Auf der linken Seite ist der beschriebene Lenkradwinkeleinschlag dargestellt, die rechte Seite zeigt den resultierenden Querbeschleunigungsverlauf jeweils genormt auf den Wert im eingeschwungenen Zustand. In diesem Beispiel wird bei einer konstanten Geschwindigkeit von $v(t) \approx 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ das Lenkrad so eingeschlagen, dass das Fahrzeug auf trockener Straße eine stationäre Querbeschleunigung von $\ddot{y}_{\text{stat}} \approx 0,4g$ erreicht.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der Aufbau der Normalbeschleunigung mit einem endlichen Ruck $j^n(t)$ erfolgt und zeitlich verzögert zum Lenkradeinschlag einsetzt. Bei der Entwicklung eines entsprechenden Modells werden beide Effekte berücksichtigt. In der in Abbildung 6.8 ersichtlichen Modellierung ist sowohl der Verlauf der Querbeschleunigung

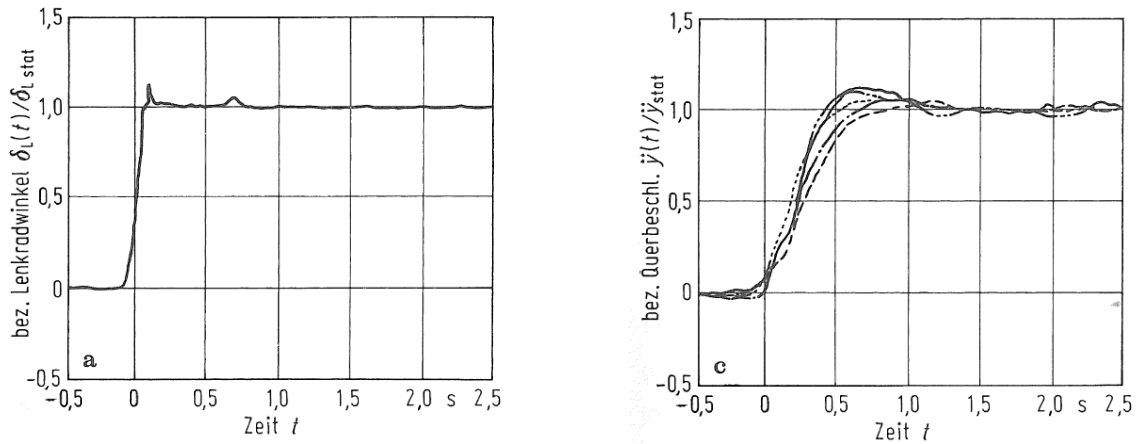


Abbildung 6.7: Experimentelle Ergebnisse aus genormten Fahrversuchen, entnommen aus Mitschke und Wallentowitz (2004), Links: Lenkwinkelverlauf, genormt auf den Wert im eingeschwungenen Zustand δ_{Lstat} , Rechts: Resultierender Querbeschleunigungsverlauf, genormt auf den Wert im eingeschwungenen Zustand \ddot{y}_{stat} , Randbedingungen: $v(t) \approx 100 \frac{km}{h}$, $\ddot{y}_{stat} \approx 0,4g$, trockene Straße, $\frac{d\delta_L(t)}{dt} > 200^\circ/s$

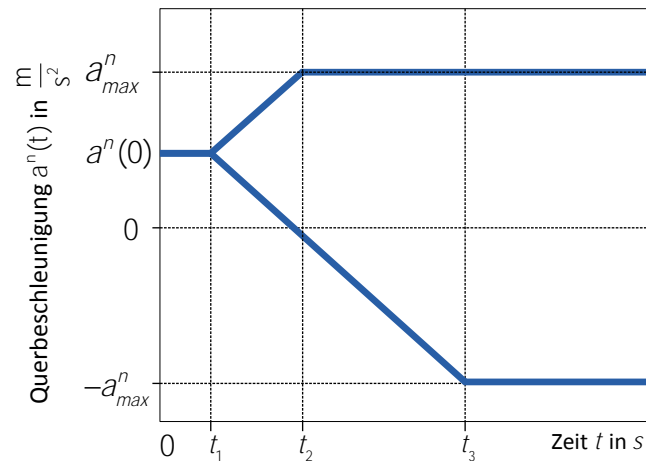


Abbildung 6.8: Modellierung des Querbeschleunigungsverlaufes über die Zeit, beispielhaft zum Zeitpunkt einer Kurvenfahrt mit $a^n(0) \neq 0$

für ein Ausweichen nach links als auch nach rechts zu sehen. Das Fahrzeug selbst besitzt zum Zeitpunkt 0 bereits eine Normalbeschleunigung und beschreibt eine Linkskurve. Die Zeit t_1 stellt eine Totzeit dar. Zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 bzw. t_1 und t_3 wächst die Normalbeschleunigung linear bis auf das Maximum a_{max}^n bzw. $-a_{max}^n$ an, was einem konstanten Querruck $j^n = \frac{\delta a^n(t)}{\delta t} = \text{const}$ entspricht.

Die Totzeit t_1 wird in dreifacher Hinsicht genutzt. Zum einen bildet sie die Verzögerung zwischen Lenkradeinschlag und Querbeschleunigungsaufbau ab. Dies ist nur dann der Fall, wenn der Fahrer sich nicht bereits in einer Kurvenfahrt befindet ($a^n(0) \approx 0$). Zum Zweiten wird der Fahrerzustand berücksichtigt. Einem Fahrer, der seinen Blick abwendet und der somit als unaufmerksam klassifiziert wird, gesteht die aktive Gefahrenbremse eine reaktionslose Zeit zu, in der er keine Ausweichmanöver beginnen wird. Die Zeitspanne ist auf $t_1 = 500\text{ms}$ festgesetzt und orientiert sich an Untersuchungsergebnissen von Stolzmann u. a. (2010). Die Autoren untersuchten im Rahmen des AKTIV Projektes Reaktionszeitdifferenzen zwischen aufmerksamen und abgelenkten Fahrern. Die genutzten 500ms repräsentieren dabei den Durchschnitt, wobei kürzere Reaktionszeiten lediglich bei Telefonaufgaben gemessen wurden, bei denen es nicht zu einer Blickabwendung kam. Der Parameter t_1 wird zudem für die zeitliche Vorverlagerung der Warnung verwendet. Hierzu werden $t_1 = 500\text{ms}$ auf die Totzeit addiert, die aktuell von den Analysen für die Teil- bzw. Vollbremsung verwendet werden.

Die Höhe des Querrucks $j^n = \frac{\delta a^n(t)}{\delta t} = \text{const}$ kann aus den Daten in Abbildung 6.7 nur geschätzt werden. So ergibt er sich zu $j^n = \frac{4 \frac{m}{s^2}}{0,5s} = 8 \frac{m}{s^3}$. Dies erscheint in Anbetracht eigener Erfahrungen ein deutlich zu geringer Wert zu sein. Mit den Ergebnissen von gefahrenen Ausweichmanövern, wie sie in der Dissertation von Nitz (2010) veröffentlicht und in Abbildung 6.9 dargestellt sind, ergeben sich wesentlich höhere Werte von schätzungsweise $j^n = \frac{9 \frac{m}{s^2}}{0,3s} = 30 \frac{m}{s^3}$.

Nunmehr stellt sich die Frage nach dem Maximum der Normalbeschleunigung a_{max}^n . Für diesen Wert muss, um eine Bevormundung des Fahrers zu vermeiden, von der Kraftschlussgrenze und damit von $a_{max}^n = 10 \frac{m}{s^2}$ ausgegangen werden. Kann der Fahrer auch mit einem derart sportlichen Manöver nicht ausweichen, so ist die wesentlichste Bedingung für die Auslösung einer automatischen *Voll*-bremsung erfüllt. Über eine Variation dieses Parameters soll erreicht werden, dass die entsprechende Bedingung für die Auslösung einer *Teil*-bremsung früher eintritt. Hierbei soll zudem berücksichtigt werden, dass die maximale Querbeschleunigung in Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit steht. Unabhängig voneinander beschreiben Hackenberger und Heißing (1982) sowie Hamberger (1999) einen solchen Zusammenhang. Ihre Ergebnisse sind in Abbildung 6.10 zu sehen, wobei die Werte nicht direkt vergleichbar sind. Während Hackenberger und Heißing (1982) die Funktion $a^n(t) = f(v(t))$ direkt beschreiben, untersuchte Hamberger (1999), mit welchen Quergeschwindigkeiten Probanden noch durch Kurven fahren. Mit Hilfe der Formeln

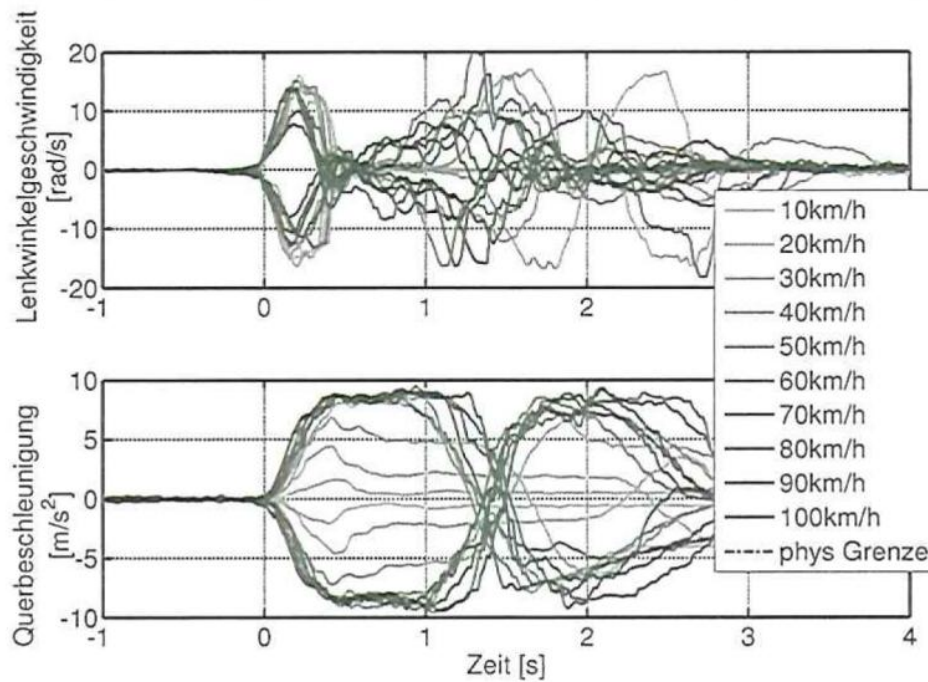


Abbildung 6.9: Querbeschleunigungsverläufe von Notausweichmanövern, entnommen aus Nitz (2010)

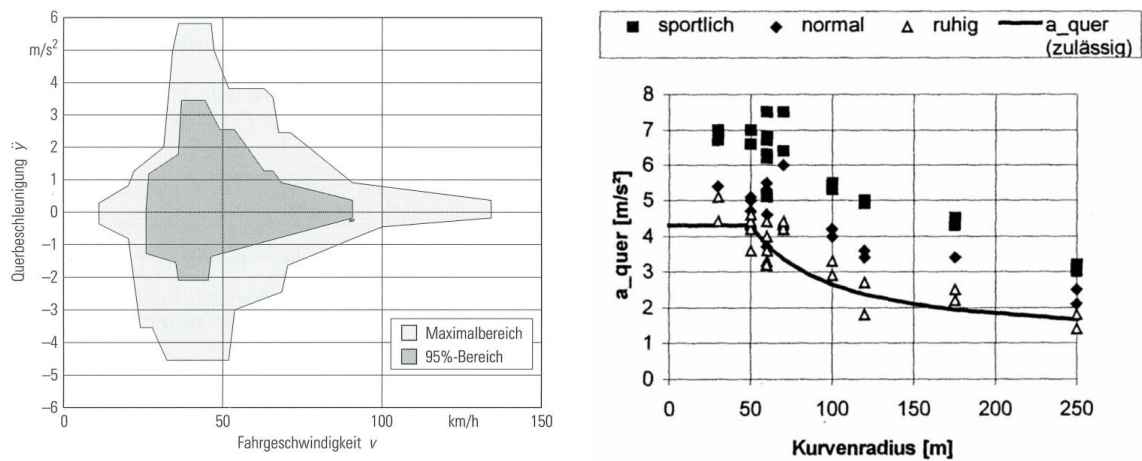


Abbildung 6.10: Normalbeschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Links: Entnommen aus Hackenberger und Heißing (1982), Rechts: Entnommen aus Hamberger (1999)

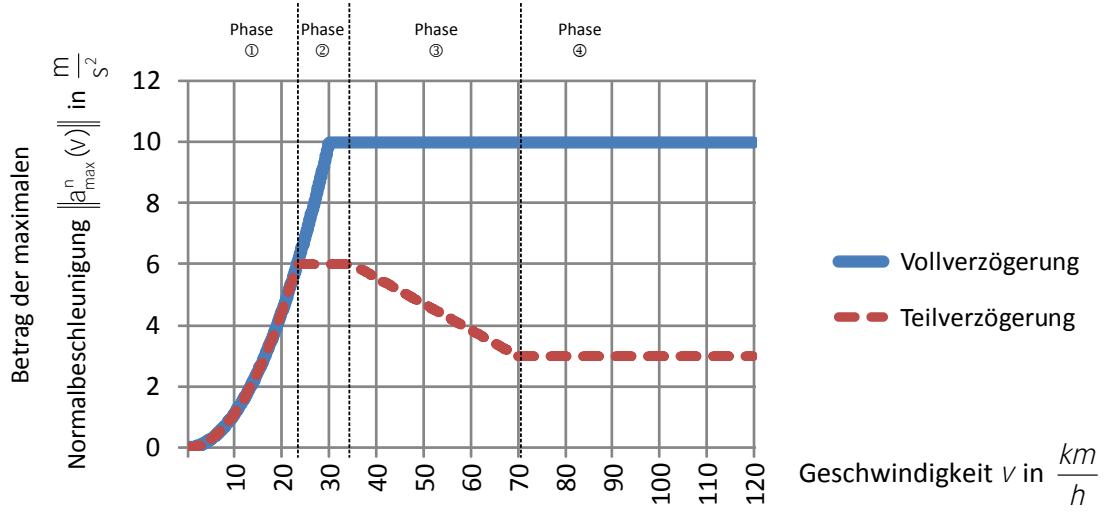


Abbildung 6.11: Modellierung des Betrages der Normalbeschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für das EGO

$$v(t) = \sqrt{a^n(t)r} \quad (6.21)$$

$$a^n(t) = \frac{v^2}{r} \quad (6.22)$$

kann man allerdings auf $a^n(t) = f(v(t))$ schließen, wobei r den Kurvenradius beschreibt. So fährt ein Normalfahrer die Kurven so, dass er bei einer Geschwindigkeit von $v = 54 \frac{km}{h}$ eine Normalbeschleunigung von $a^n(t) = 4,2 \frac{m}{s^2}$ erfährt ($v = 62 \frac{km}{h} \rightarrow a^n(t) = 3 \frac{m}{s^2}$, $v = 75 \frac{km}{h} \rightarrow a^n(t) = 2,5 \frac{m}{s^2}$). Diese Werte entsprechen denjenigen aus dem Diagramm von Hackenberger und Heißing (1982). In Anlehnung an diese Ergebnisse wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das in Abbildung 6.11 gezeigte Modell des Betrages der maximalen Normalbeschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verwendet. Die Kurven für die Teil- und Vollverzögerung verlaufen zunächst gleich. In dieser Phase ① bestimmt der Wendekreis des nicht holonom agierenden Fahrzeugs den Zusammenhang $\|a^n(t)\| = f(v(t), r = r_{Wendekreis})$ entsprechend der Formel 6.22. Während für die Vollverzögerung diese Einschränkung bis zur Haftungsgrenze von $\|a_{max}^n\| = 10 \frac{m}{s^2}$ gilt, orientiert sich der Verlauf für die Teilverzögerung am linken Plot aus Abbildung 6.10. In Phase ② und ③ zeichnet der Verlauf den Plot vereinfacht nach. In Phase ④ wird abweichend von einer möglichen Normalbeschleunigung von $\|a^n(t)\| = 3 \frac{m}{s^2}$ ausgegangen, da der wesentlich niedrigere Wert aus Hackenberger und Heißing (1982) nicht den eigenen Erfahrungen entspricht.

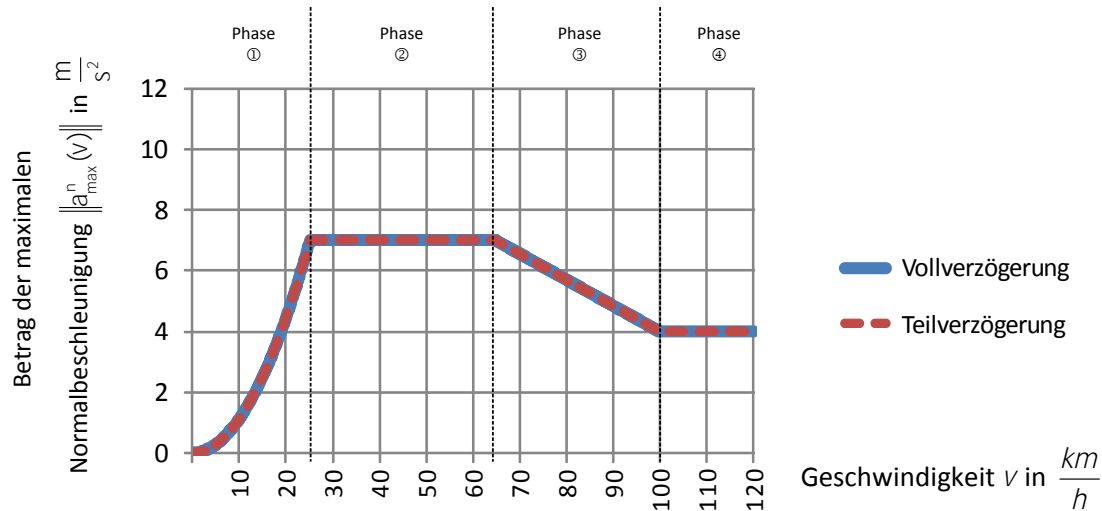


Abbildung 6.12: Modellierung des Betrages der Normalbeschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Fremdfahrzeuge

6.6 Modellierung der Fremddynamik

Für die Prädiktion der Fremdfahrzeuge werden die gleichen Modelle wie für die des eigenen Fahrzeuges herangezogen, lediglich die Parametrierung unterscheidet sich. So werden die Startwerte $x(0)$, $y(0)$ und $v(0)$ aus den entsprechenden gemessenen Werten x_{mess} , y_{mess} , φ_{mess} und v_{mess} abgeleitet. Da zum Zeitpunkt der Arbeiten keine Ausrichtung $\varphi(0)$ bzw. deren Ableitung $\dot{\varphi}(0)$ von Fremdfahrzeugen verfügbar war und von Autobahnszenarien ausgegangen wird, werden diese Variablen mit $\varphi(0) = \dot{\varphi}(0) = 0$ angenommen. Die gleiche Annahme gilt für die Totzeit $t_1 = 0$ entsprechend Abbildung 6.8. Diese konservative Annahme spiegelt das Unwissen über den Fahrerzustand des Fremdfahrzeugführers bzw. den Lenkwinkel in diesem Fahrzeug wider. Die Normalbeschleunigung ist dagegen messbar und wird auf $a^n(0) = a_{mess}^n$ gesetzt. Weiterhin gilt der in Abbildung 6.8 dargestellte Verlauf des Normalbeschleunigungsaufbaus. Der Betrag des Maximums der Normalbeschleunigung wird auch für Fremdfahrzeuge geschwindigkeitsabhängig ermittelt, wobei die konkreten Werte aus den Ergebnissen von Hamberger (1999) für sportliche Fahrer abgeleitet wurden (siehe Abbildung 6.10, rechts). Die verwendeten Werte sind in Abbildung 6.12 ersichtlich.

6.7 Formmodelle

Für die Kollisionsanalyse sind Annahmen zur Fahrzeugform wichtig. Für das EGO kann dabei auf die tatsächlichen Ausmaße zurückgegriffen werden. Mit einem Box-Modell er-

geben sich Länge und Breite $l_{EGO} = 5,089m$ und $b_{EGO} = 2,177m$, wobei bezüglich der Breite auch die ausgeklappten Spiegel Berücksichtigung finden. Für die Fremdfahrzeuge müssen leider Annahmen getroffen werden, da zum Entwicklungszeitpunkt weder die Breite noch die Länge durch die primäre Wahrnehmung als sichere Werte angeboten wurden. Im Folgenden wird daher mit $l_{FFZ} = 4,0m$ und $b_{FFZ} = 1,9m$ gerechnet, was gerundet den Werten des kleinsten Fahrzeuges aus der AUDI Palette entspricht (AUDI A1, $l = 3,954m$, $b = 1,906m$).

7 Probandenstudie zum Grenzverhalten bei Tordurchfahrten

Die Situationsanalyse der aktiven Gefahrenbremsung hat die Aufgabe, das Gebiet zu bestimmen, das unfallfrei erreicht werden kann. Für die Berechnung können Lücken einer bestimmten Breite als unpassierbar angenommen werden. Legt man für die Bestimmung des Breitenparameters die rein physikalischen Grenzen zu Grunde, dann muss man dem Fahrer zugestehen, auch mit 80 km/h durch Lücken zu fahren, die der Fahrzeugbreite entsprechen. Besonders aggressiven Fahrern könnte man sogar den Verlust der Spiegel unterstellen. Solch eine Systemauslegung führt zu einer Nutzenminimierung. Eine fahrerorientierte Parametrierung hingegen, die ihn nicht bevormundet, aber dessen Grenzen beachtet, kann eine Nutzenerhöhung bewirken. Es stellt sich also die Frage, welche Lückenbreiten für Fahrer bei welchen Geschwindigkeiten akzeptabel sind. Die konkreten Werte einer solchen Parametrierung auszuloten, ist die Motivation für die im Folgenden beschriebene Studie. Ziel ist es, die Messlatte für einen aufmerksamen, nicht abgelenkten Fahrer zu bestimmen und so zu einer Aussage über das Grenzverhalten zu kommen.

Dieses Kapitel beschreibt zunächst den Stand der Forschung. Anschließend werden Hypothesen aufgestellt und Vorhersagen getroffen. Im darauf folgenden Abschnitt werden der Aufbau und der Ablauf der Studie beschrieben. Die beiden letzten Teile widmen sich der Darstellung und der Diskussion der Ergebnisse.

7.1 Stand der Forschung

Zu der Fragestellung

„Welche Lückenbreiten sind Fahrer bereit zu durchfahren?“

konnten in der Literatur keine relevanten Arbeiten gefunden werden. Gesucht wurde hierbei in der IEEE/IET Electronic Library sowie in allen Bänden des Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2002 bis FAS2011.¹¹⁶

¹¹⁶Der Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS20XX ist eine von Prof. Maurer und Prof. Stiller organisierte Tagung zum wissenschaftlichen Austausch im Forschungsbereich der Fahrerassistenzsysteme.

7.2 Hypothesen und Vorhersagen

Bei der Ermittlung des unfallfrei befahrbaren Raumes können von vornherein Lücken bis zu einer bestimmten Breite ignoriert werden. Die eigene Erfahrung führt zu der Annahme, dass Fahrer enge Lücken zwischen Fahrzeugen oder statischen Hindernissen meiden bzw. nur sehr langsam durchfahren. Dies ist vor allem im städtischen Verkehr auf Straßen in Wohngebieten beobachtbar. Für die Studie lassen sich hieraus zwei Hypothesen ableiten:

Hypothese 1

Fahrer manövrieren nicht durch Lücken, die der Fahrzeugbreite entsprechen oder kleiner sind als diese.

Hypothese 2

Die akzeptierte Lückenbreite ist abhängig von der Durchfahrgeschwindigkeit.

Mit der Verifizierung der ersten Hypothese würde bestätigt werden, dass Fahrer den Verlust der Spiegel des Versuchsfahrzeuges oder eine weitere Beschädigung nicht in Kauf nehmen. An dieser Stelle wird vorhergesagt, dass sie dies nicht tun werden. Für die zweite Hypothese wird erwartet, dass die nicht akzeptierte Lückenbreite bei höheren Geschwindigkeiten zunimmt. Zusätzlich soll eine Formel der Form $b_{min} = f(v)$ bestimmt werden, sodass im laufenden Betrieb die gerade noch akzeptable Lückenbreite ermittelt werden kann.

7.3 Aufbau und Ablauf der Studie

Der Probandenpool für die Untersuchungen wurde entsprechend der Maßgabe an die Studie zusammengestellt, vor allem das Fahrverhalten von motorisch wie situativ aufmerksamen sowie körperlich fitten Fahrern zu untersuchen, die bereits über genügend Fahrerfahrung verfügen. In Abbildung 7.1 ist die Zusammensetzung des Pools nach Alter sowie Fahrleistung aufgeschlüsselt. Das Durchschnittsalter der Probanden beträgt 26,5 Jahre und verteilt sich im Wesentlichen auf die Altersspanne von 24 bis 28 Jahren. Die gezeigte Jahresfahrleistung bezieht sich auf die vorausgehenden zwölf Monate und liegt im Durchschnitt bei 22.611 km, wobei ein Großteil (14 Personen) eine eher geringe Fahrleistung von 10.000 - 19.000 km ausweist.

Beim Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen AUDI Q7 quattro TDI 3.0, Modelljahr 2011 mit Reifen des Typs 294/40 R20 110Y. Aufgrund des gleichen Typs kommt dieses Fahrzeug in seinen Fahreigenschaften denen des Versuchsträgers, wie er für die prototypische Darstellung der aktiven Gefahrenbremsung verwendet und im Anhang A beschrieben wird, sehr nahe.

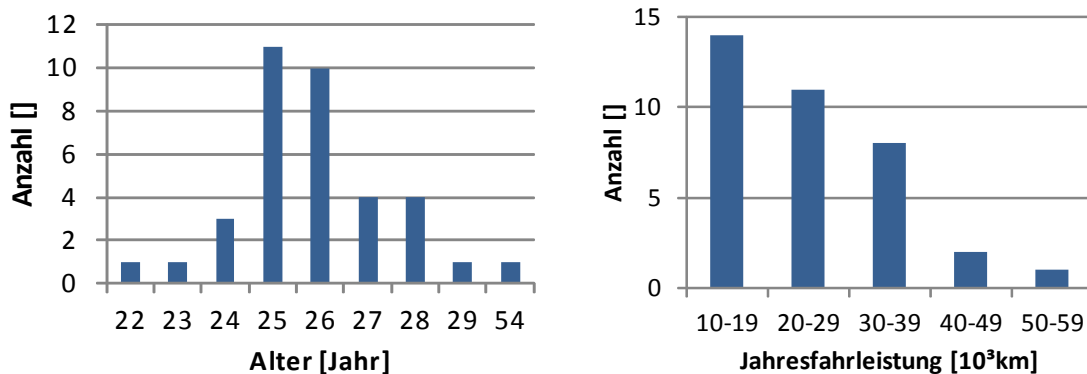


Abbildung 7.1: Beschreibung des Probandenpools, Links: Zusammensetzung nach Alter, Rechts: Zusammensetzung nach Jahresfahrleistung in Tausend km

Die Studie wurde auf dem ehemaligen Taxiway des Flughafens der Universität der Bundeswehr in München durchgeführt. Pro Proband dauerte die Untersuchung 60-80 Minuten und gliederte sich in drei Abschnitte:

In der **Kennenlernphase** erhielten die Versuchspersonen die Gelegenheit, sich mit dem Fahrzeug vertraut zu machen. Hierzu fuhren sie zunächst einige Runden auf dem Gelände des Flughafens ohne weitere Anleitung, um im Anschluss einen Doppelspurwechsel und eine Kurvenfahrt zu üben. Um die Ausmaße des Autos einschätzen zu können, erhielten die Teilnehmer zudem die Gelegenheit, mehrfach zwischen Hütchen einzuparken.

In der **Versuchsphase** absolvierten die Fahrer kombinierte Tests zu Tordurchfahrten und Doppelspurwechseln. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

In der **Protokollphase** machten die Probanden Angaben über ihre Fahrleistung, ihren Fahrstil etc. und konnten zudem eigene (Beinah-)Unfallerlebnisse schildern.

In der Versuchsphase sollten die Versuchspersonen in jeder Runde entscheiden, ob sie eine Lücke zwischen zwei Fahrzeugattrappen durchfahren oder davor anhalten würden. Jeder Teilnehmer fuhr den Parcours zwischen 9 und 13 Mal, wobei das Abbruchkriterium durch die Konvergenz der Durchfahrbreite im Torversuch definiert wurde. In diese Durchläufe wurde zudem ein zweiter Test eingestreut, so dass sich die Probanden nicht einzig und allein auf die Tordurchfahrt konzentrierten. Der zweite Test dient der Analyse des Ausweichverhaltens in Grenzsituationen und ist Gegenstand weiterer Forschungen, die über den Dokumentationsstand dieser Dissertation hinausgehen. In Abbildung 7.2 ist der Testaufbau schematisch dargestellt. Die Versuchspersonen fuhren hierbei folgenden

Parcours:

Als Startplatz diente ①.

Bei ② wurde ein an dieser Stelle nicht weiter dokumentierter Versuch zu Doppelspurwechseln durchgeführt.

Bei ③ pausierte der Fahrer kurz. In dieser Zeit wurde die Lückenbreite angepasst, ohne dass der Fahrer die Veränderungen einsehen konnte.

Ab ④ folgte der Fahrer einem leichten, anspruchslosen Slalomkurs. Dieser diente zur Aufmerksamkeitssteuerung der Teilnehmer - es war ihnen dadurch nicht möglich, das Tor von weitem anzupeilen und abzuschätzen.

Mit einer Zeitlücke von 1,5 Sekunden zum Tor endete das letzte Element des Slaloms und die Fahrer mussten sich bei ⑤ entscheiden, ob sie das Tor durchfahren würden. Auf dem entsprechenden Foto aus Abbildung 7.2 ist ein Versuch zu erkennen, bei dem sich der Fahrer für eine Bremsung entschied und anschließend seitlich vorbeifuhr. In Anhang B ist eine Bilderstrecke dieser Anfahrt zu sehen.

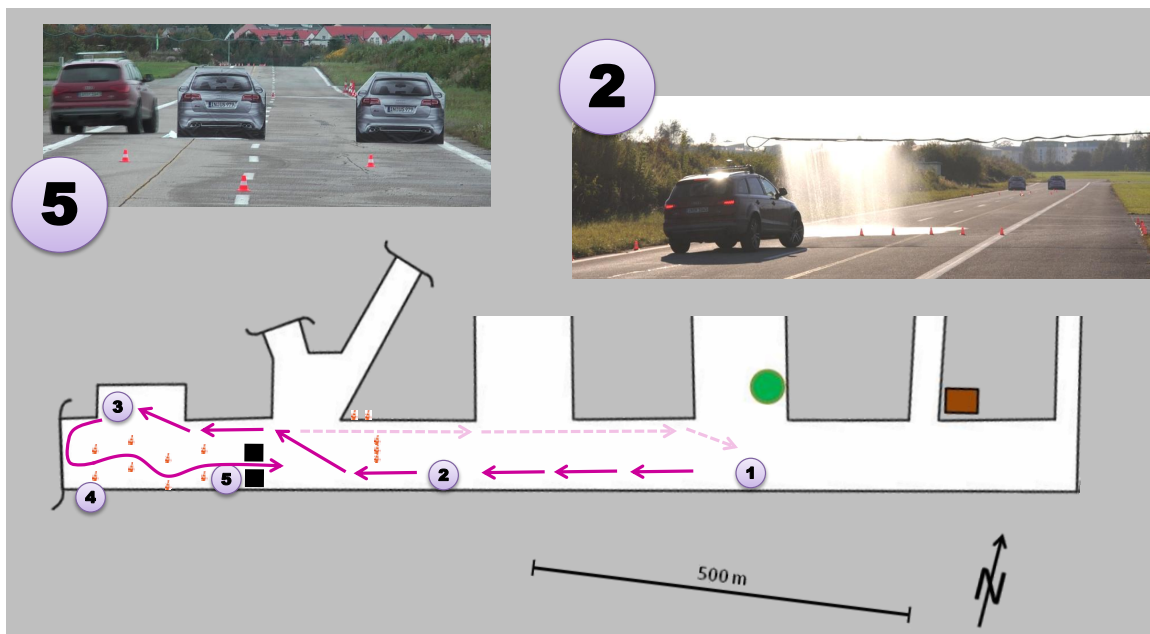


Abbildung 7.2: Ablauf innerhalb der Versuchsphase, ① Startpunkt, ② Doppelspurwechsel, ③ Pausieren für Umbauten, ④ leichter Slalom, ⑤ Tordurchfahrt

Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (40, 60 und 80 km/h) durchgeführt, wobei jede Versuchsperson nur eine der Geschwindigkeiten fuhr. Die drei Varianten wurden eingeführt, um die vermutete Geschwindigkeitsabhängigkeit der akzeptierten Lückenbreite ggf. parabelförmig modellieren zu können. Eingezeichnet ist jeweils die kleinste unfallfrei und ungebremst durchfahrene Torbreite einer Versuchsperson.

Im Zuge der mehrfachen Anfahrten auf das Tor wurde der Abstand zwischen den Fahrzeugen in Abhängigkeit der Reaktion der Testperson bei den vorherigen Fahrten angepasst. Hierbei diente der Robbins-Monro Algorithmus als Berechnungsverfahren der neuen Lückenbreite (Vgl. Robbins und Monro (1951)). Dieses hat die Eigenschaft, um den gesuchten Parameter schrittweise zu konvergieren. Im konkreten Fall wurde der Test als vollständig angesehen, wenn der Unterschied der ermittelten zur letzten Breite kleiner als $\delta_{\text{Breite}} = |b_{n+1} - b_n| \leq 0,15m$ war. Der gesuchte Parameter ergab sich dann aus der kleinsten unfallfrei und ungebremst durchfahrenen Lückenbreite.

7.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Versuches sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Im Diagramm wird die Lückenbreite in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit aufgetragen, wobei die Lückenbreite auf die Fahrzeugbreite normiert ist, um den Zusammenhang leichter auf andere Fahrzeuge übertragen zu können. Die erste Hypothese

Hypothese 1

Fahrer manövrieren nicht durch Lücken, die der Fahrzeugbreite entsprechen oder kleiner sind als diese

kann bestätigt werden. Keiner der Probanden versuchte durch eine für das Fahrzeug zu enge Lücke zu fahren. Die beiden Messwerte der Probanden 4 und 13 mit $v_4 = 75,11 \frac{km}{h}$, $b_4 = 1,05$ sowie $v_{13} = 60,0 \frac{km}{h}$, $b_{13} = 1,05$ charakterisieren den engsten Torabstand. Somit kann eine Untergrenze angegeben werden: Jeder Proband durchfuhr das Tor, wenn dieses mindestens 5% breiter als das Fahrzeug war (entspricht 0,1 m).

Für die Überprüfung der zweiten Hypothese

Hypothese 2

Die akzeptierte Lückenbreite ist abhängig von der Durchfahrgeschwindigkeit

wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. In den Tabellen 7.1 und 7.2 sind die entsprechenden Ergebnisse aufgeschlüsselt. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Lückenbreite kann nicht festgestellt werden ($F(2,33) = 0,871, p > 0,05$). Die in Abbildung 7.3 eingezeichnete Trendlinie verleitet zwar auf den ersten Blick, einen Zusammenhang zu erkennen, aber bei der Betrachtung der approximierten Geraden

$$b = -\frac{25}{100000} * v + 1,2676 \quad (7.1)$$

wird deutlich, dass von einer Abhängigkeit nicht gesprochen werden kann.¹¹⁷

¹¹⁷Die Formel 7.1 bezieht sich auf SI-Einheiten.

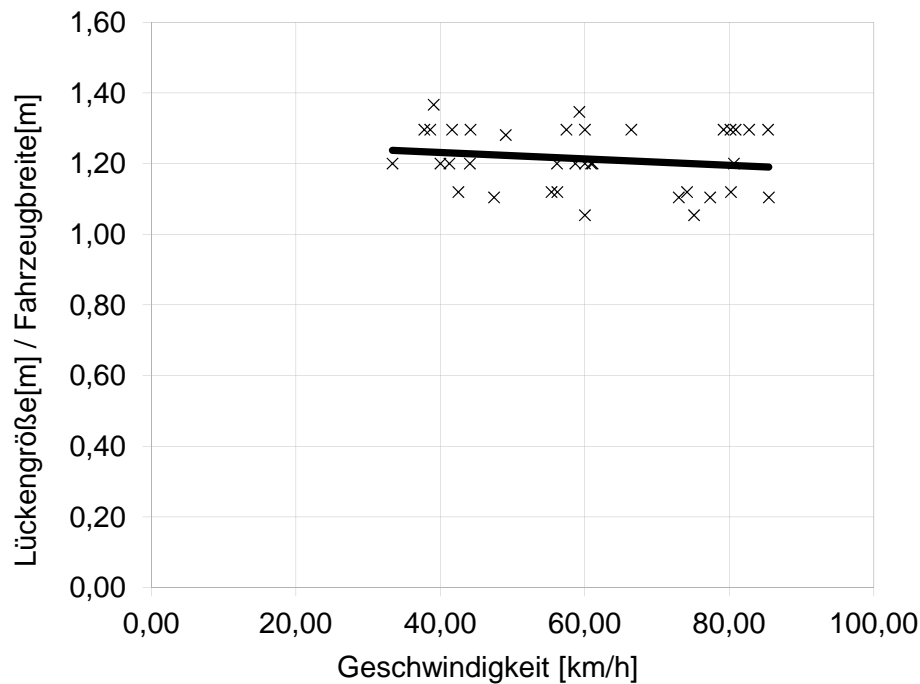


Abbildung 7.3: Versuchsergebnisse der Tordurchfahrt

7.5 Diskussion

Es stellt sich nunmehr die Frage, welche geschwindigkeitsunabhängige Breite bei der aktiven Gefahrenbremsung als engstes Maß angenommen werden kann. Hierbei ist es möglich, für die drei kaskadierenden Stufen *Warnung*, *Teilverzögerung* und *Vollverzögerung* jeweils eigene Werte festzulegen. Bei der *Vollbremsung* besteht die Maßgabe, dass für den Fahrer nur gebremst werden darf, wenn das Durchfahren für ihn keine annehmbare Alternative ist. Aus diesem Grund wird für diese Analyse der oben beschriebene minimale Offset von 5% der Fahrzeugbreite verwendet. Weiterhin wird hinsichtlich der *Teilverzögerung* grundsätzlich das gleiche Verhalten wie bei der *Warnung* erwartet, nur dass letztere zeitlich vorverlegt sein soll. Da die Vorverlegung über eine Variation der Totzeit t_1 und nicht über eine Anpassung der Lückenbreite realisiert wird, sind die verwendeten Werte in beiden Fällen identisch. Im Rahmen der weiteren Arbeiten wird hierfür vom Mittel der unteren 20% der Messwerte ausgegangen, was einer Lückenbreite von 110% entspricht. In Tabelle 7.3 sind die in dieser Studie ermittelten Breiten aufgeschlüsselt und den drei Analyseausprägungen *Achtenswert*, *Kritisch* sowie *Unvermeidbar* zugeordnet.

Die Abhängigkeit der Lückenbreite von der Geschwindigkeit kann für den Bereich zwischen 40 und 80 km/h verneint werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass dies auch für alle höheren Geschwindigkeiten der Fall ist. Für alle niedrigeren Geschwindigkeiten muss die Annahme getroffen werden, dass dieser Umstand nicht gilt. Allein aus der

Alltagserfahrung ist bekannt, dass Fahrzeuge mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten durch engere Lücken manövriert werden. Daher wird unterhalb von 40 km/h kein Sicherheitsabstand zur Seite verwendet. Diese Annahme spiegelt die konservative Herangehensweise wider, bei der die Vermeidung von Fehlauflösungen das primäre Ziel ist.

Gruppe	N	Mittelwert	Standardabweichung	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert	
				Untergrenze	Obergrenze
40 km/h	12	2,4550	0,15757	2,3549	2,5551
60 km/h	12	2,4008	0,17122	2,292	2,5096
80 km/h	12	2,3608	0,19533	2,2367	2,4849
Gesamt	36	2,4056	0,17476	2,3464	2,4647

Tabelle 7.1: Deskriptive Statistik zum Torversuch

	Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz (p)
Zwischen den Gruppen	0,054	2	0,27	0,871	0,428
Innerhalb der Gruppen	1,1015	33	0,031		
Gesamt	1,069	35			

Tabelle 7.2: Einfaktorielle Varianzanalyse zum Torversuch

Ausprägung	Lückenbreite [% Fahrzeugbreite]	Lückenbreite [m]
<hr/>		
Unterhalb 40 km/h		
Achtenswert	100	2,177m
Kritisch	100	2,177m
Unvermeidbar	100	2,177m
Oberhalb 40 km/h		
Achtenswert	110	2,395m
Kritisch	110	2,395m
Unvermeidbar	105	2,286m

Tabelle 7.3: Ermittelte Parameter der Lückenbreiten für eine aktive Gefahrenbremsung

8 CoBRA-Algorithmus zur Berechnung der Erreichbarkeitsmenge

In Abbildung 8.1 ist der Verarbeitungsablauf des *CoBRA*-Algorithmus dargestellt. Der Aufbau auf der rechten Seite entspricht der in Abschnitt II herausgearbeiteten allgemeinen Aufgabenstruktur der Situationsanalyse und dient der Einordnung des *CoBRA*-Algorithmus in den postulierten Ablauf. Hierbei ist zu erkennen, dass der Kern selbst die letzten drei Elemente *Intentionsabschätzung*, *Prädiktion* und *Interpretation* umfasst. Der komplette Algorithmus schließt zudem die *Bestimmung der Relationslagen* und *Interaktionsbeziehungen* ein. Die für die Situationsanalyse notwendige *funktionsspezifische Datenextraktion* ist die Schnittstelle zur Wahrnehmung. Im Folgenden wird zunächst auf diese Extraktion eingegangen. Anschließend steht der Kern des *CoBRA*-Algorithmus im Vordergrund. Im darauf folgenden Kapitel 8.3 wird dieser um Interaktionsmechanismen zwischen mehreren dynamischen Verkehrsteilnehmern und dem Umfeld erweitert.

8.1 Extraktion in die intervallbasierte Belegungsliste

Diese funktionsspezifische Datenextraktion hat die Aufgabe, den relevanten Ausschnitt aus der Belegungskarte herauszufiltern und die darin enthaltenen Informationen zu verdichten. Beispiele für eine solche Extraktion finden sich in Abbildung 6.2 auf Seite 74 und in Abbildung 5.1 auf Seite 62.

Die Grenzen des relevanten Bereiches bestimmt die Situationsanalyse. Im konkreten Fall der aktiven Gefahrenbremsung werden die Grenzen über das in Kapitel 6.4 vorgestellte gekrümmte Bahnmodell bestimmt (siehe Gln. 6.15 bis 6.18). Die Parametrierung entspricht dabei der für die Situationsanalyse der Vollbremsung (siehe Tabelle 8.1). Der Aufmerksamkeitsbereich umfasst zusätzlich die Ausmaße des EGO, sodass sich eine Trompetenform mit geöffnetem Anfang ergibt. Im Falle einer momentanen Kurvenfahrt krümmt sich diese Trompete zusätzlich in Richtung des Momentanpols. Die Form ist an den Seiten bei $y_{n,min} = -30m$ und $y_{n,max} = +30m$ beschnitten, da aufgrund der Sensorausstattung keine Mehrinformationen in diesen Bereichen zu erwarten sind. In der Länge wird der

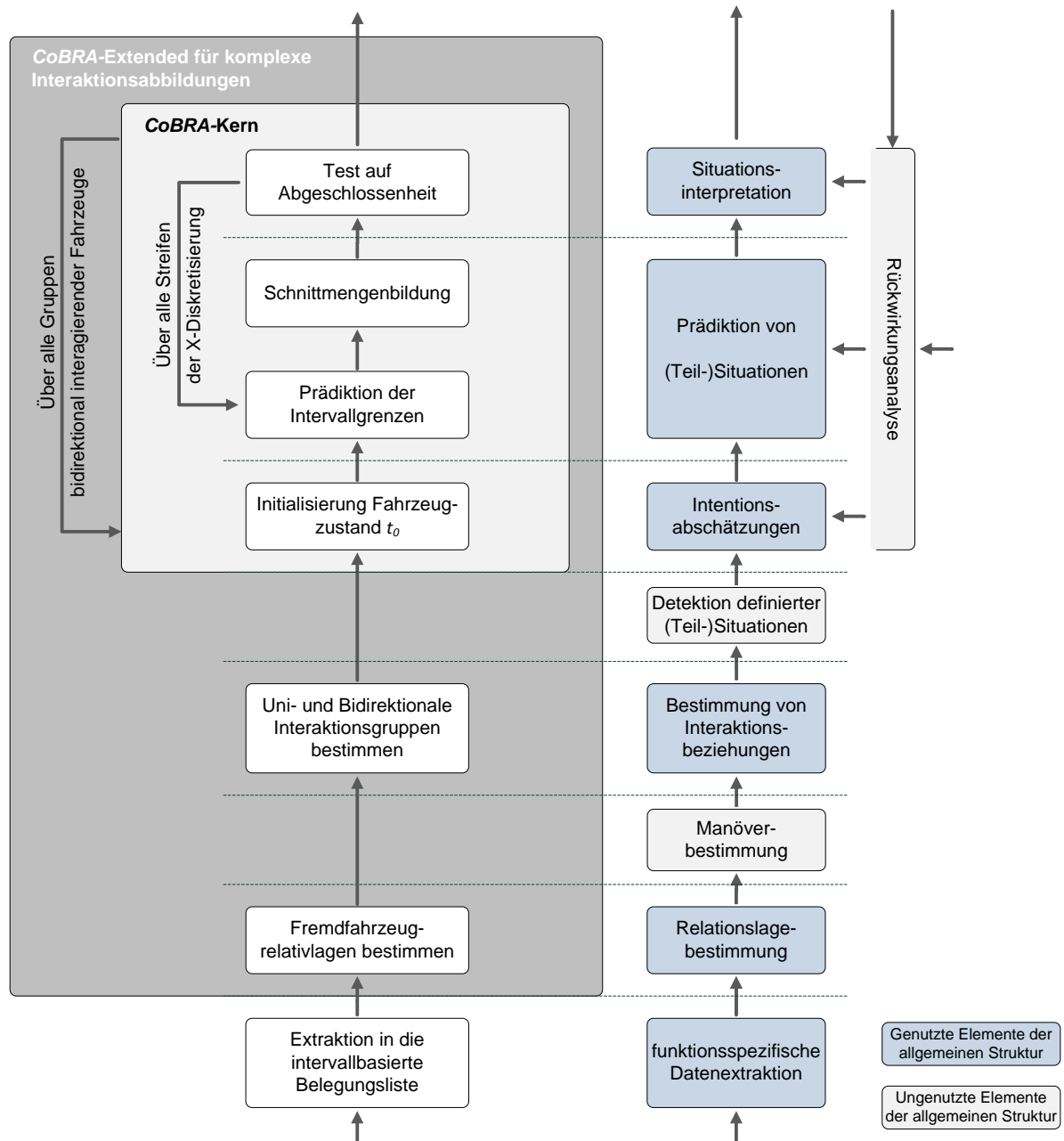


Abbildung 8.1: Verarbeitungsstufen des *CoBRA*-Algorithmus mit Gegenüberstellung zur allgemeinen Aufgabenstruktur der Situationsanalyse, wie sie in Abschnitt II herausgearbeitet wurde

Aufmerksamkeitsbereich ebenfalls beschnitten. Hierbei bestimmen der Bremsweg s_{Brems} und eine zusätzliche Zeitlücke $s_{Vorausschau}$ das Ende des extrahierten Bereichs:

$$s_{Brems} = \int_{t=0}^{0,5s} -20 \left[\frac{m}{s^3} \right] dt^3 + \int_{t=0,5}^{t_{Stillstand}} -10 \left[\frac{m}{s^2} \right] dt^2 \quad (8.1)$$

$$s_{Vorausschau} = 1[s] \cdot v_{EGO} \quad (8.2)$$

$$s_{Extraktionsgrenze} = s_{Brems} + s_{Vorausschau} \quad (8.3)$$

Bei der Berechnung wird ein linearer Verzögerungsaufbau bis zu einem Maximum von $a_{max}^t = 10 \frac{m}{s^2}$ angenommen, was eigene Erfahrungswerte mit dem Versuchsträger berücksichtigt¹¹⁸. In Abbildung 8.2 sind drei Beispiele des resultierenden Bereiches dargestellt. Im links dargestellten Fall fährt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von $v_{EGO} = 100 \frac{km}{h}$ auf einer Geraden. Im mittleren Bild fährt das Fahrzeug eine Linkskurve und im rechten Bild ist der Fahrer zusätzlich abgelenkt anstatt - wie in den anderen Beispielen - aufmerksam. Die in diesem Fall angenommene Totzeit von $t_1 = 500ms$ zieht den Anfang der Trompete in die Länge. Die Extraktionslänge ist hierbei $s_{Extraktionsgrenze} = 32,41m + 27,78m = 60,19m$. Der Rand des extrahierten Bereiches entspricht dem in Kapitel 6.3 auf Seite 77 beschriebenen Rand der maximalen Erreichbarkeitsmenge (Gl. 6.7).

Neben der Eingrenzung der Datenmenge durch die Fokussierung auf einen Aufmerksamkeitsbereich werden während der Extraktion bereits die freien Bereiche als belegt markiert, die entsprechend der Studienergebnisse aus dem vorherigen Kapitel 7 als unpassierbar angenommen werden können.

8.2 CoBRA-Kern am Beispiel der einfach-statischen Interaktion

Im Folgenden wird der Kern anhand der einfach-statischen Interaktion beschrieben. Hierbei bedeutet einfach-statisch, dass nur **ein** Fahrzeug - zum Beispiel das EGO - betrachtet wird, welches sich in einer rein **statischen** Umgebung kollisionsfrei bewegen soll. Die Erläuterungen folgen der in Abbildung 8.4 auf der linken Seite aufgezeigten Verarbeitungskette, wobei zuvor die Grundgedanken des Algorithmus erklärt werden.

¹¹⁸An dieser Stelle können auch Informationen zum Reibwert in die Modellierung einfließen. Da aber zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation keine funktionierenden Schätzer zum Reibwert vor dem Fahrzeug - also zum Reibwert der noch zu fahrenden Strecke - existierten, wird dies an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Nutzung von Reibwertinformationen über die zurückgelegte Strecke ist ebenfalls nicht sinnvoll, da damit Falschauslösungen provoziert werden können.

Parameter	Einheit	EGO Berechnungen			FFZ
		Warnung	Teilverz.	Vollverz.	Prädiktion
Startwerte					
$x(0)$	m	0	0	0	x_{mess}
$y(0)$	m	0	0	0	y_{mess}
$v(0)$	$\frac{m}{s}$	0	0	0	v_{mess}
$\varphi(0)$	rad	0	0	0	0
$\dot{\varphi}(0)$	$\frac{rad}{s}$	0	0	0	0
$a^t(0)$	$\frac{m}{s^2}$	0	0	0	a^t_{mess}
$a^n(0)$	$\frac{m}{s^2}$	a^n_{mess}	a^n_{mess}	a^n_{mess}	a^n_{mess}
Verlauf $a^n(t)$					
t_1 aufmerksam	ms	500	0	0	0
t_1 unaufmerksam	ms	1000	500	500	0
j^n	$\frac{m}{s^3}$	10	10	20	20
$\ a^n_{max}\ $	$\frac{m}{s^2}$	6	6	10	7

Tabelle 8.1: Parametergestaltung für die Analysen zur Warnung, Teil- und Vollverzögerung, FFZ steht für Fremdfahrzeug

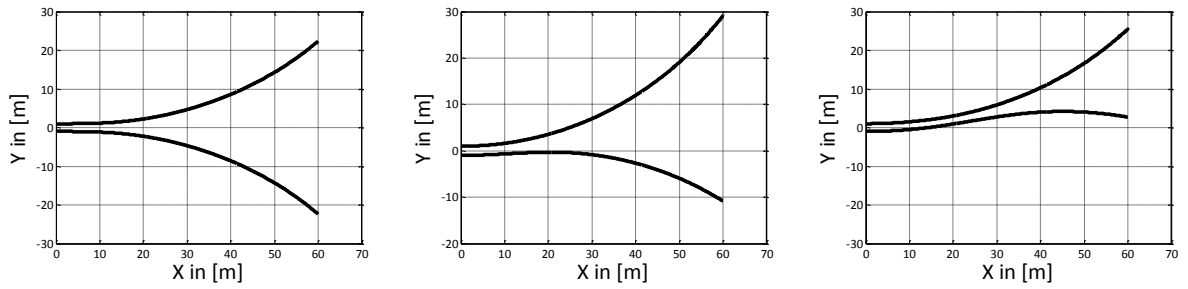


Abbildung 8.2: Beispiele für die Vorgabe des Extraktionsbereiches bei $v_{EGO} = 100 \frac{km}{h}$, Links: Bei einer Geradeausfahrt, Mitte: Kurvenfahrt nach links, Rechts: Kurvenfahrt nach links mit unaufmerksamen Fahrer

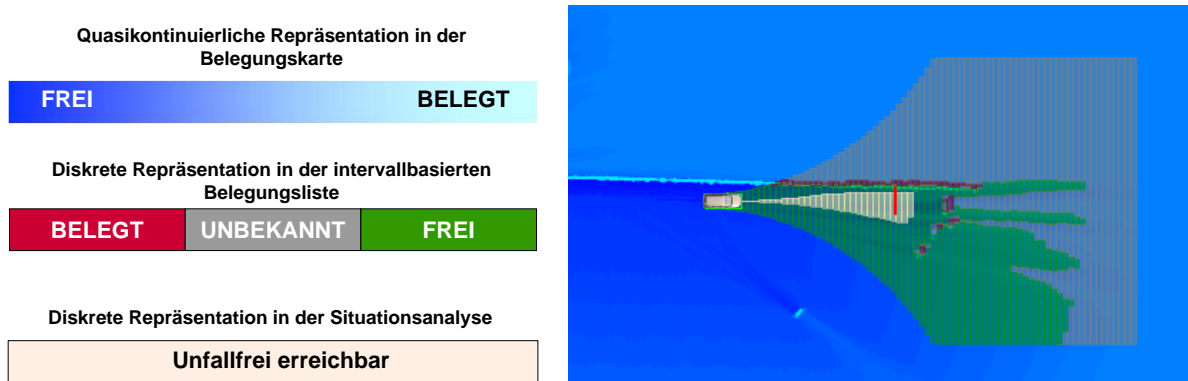


Abbildung 8.3: Beispielergebnis des *CoBRA*-Kernalgorithmus, Abb. links: Legende, Abb. rechts Hintergrund: Belegungskarte, Abb. rechts Zwischenschicht: Intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsinformation des *CoBRA*-Kernalgorithmus, Abb. rechts oben in beige: Kollisionsfrei erreichbarer Raum, Abb. rechts roter Strich: Bremsweg bei Vollverzögerung

8.2.1 Grundgedanken des *CoBRA*-Kernalgorithmus

Der *CoBRA*-Kernalgorithmus untersucht, ob für ein Fahrzeug irgendeine Möglichkeit existiert, eine statische Umgebung kollisionsfrei zu passieren. Im Zuge der Berechnungen beschreibt er dabei das Aufenthaltsgebiet, das kollisionsfrei erreichbar ist. Ein Beispiel dieses Zwischenergebnisses wird in Abbildung 8.3 gegeben. Der Algorithmus untersucht den Raum in diskreten Schritten entlang der Fahrzeuglängsachse und arbeitet somit nicht in äquidistanten Zeitschritten. Die Diskretisierung entspricht der der Eingangsdaten aus der intervallbasierten Belegungsliste. In jedem der Streifen dieser Liste durchläuft der Algorithmus drei Arbeitsschritte: Zunächst werden vom Streifen n zum Streifen $n+1$ die mit der unterlegten Dynamik erreichbaren Gebiete ermittelt. Im zweiten Schritt werden diese Gebiete mit den Belegtinformationen aus der intervallbasierten Belegungsliste verglichen und all diejenigen Gebiete herausgestrichen, die aufgrund eines Hindernisses nicht kollisionsfrei erreichbar sind. Abschließend wird untersucht, ob der kollisionsfrei erreichbare Raum abgeschlossen ist - es also keine Möglichkeit gibt, die statische Umgebung kollisionsfrei zu passieren. Im Beispiel aus Abbildung 8.3 ist die Menge abgeschlossen und das Fahrzeug wird im letzten Moment selbsttätig bremsen.

Eine weitere Eigenschaft des *CoBRA* ist, dass der kollisionsfrei erreichbare Raum nur über seine Grenzen beschrieben wird. Alle Gebiete zwischen den Grenzen können als kollisionsfrei erreichbar angesehen werden, ohne exakt zu wissen, auf welcher Trajektorie einzelne Punkte angefahren werden könnten. Aus diesem Grund beschäftigen sich alle Ausführungen in den folgenden Unterkapiteln lediglich mit der Betrachtung der linken Grenzen $\lambda_{n,m}$ bzw. rechten Grenzen $\rho_{n,m}$, wobei n den Streifen angibt und m mehrere Grenzen innerhalb eines Streifens unterscheidet.

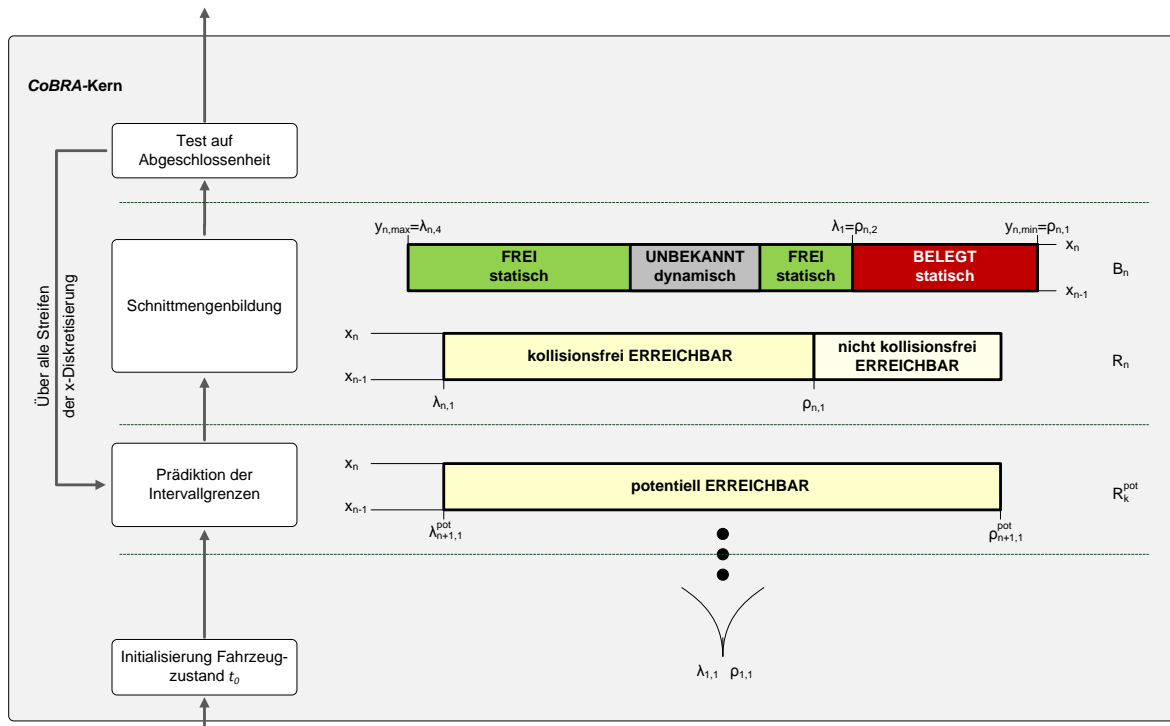


Abbildung 8.4: Visualisierung der Arbeitsschritte des CoBRA-Kerns und einhergehende interne, intervallbasierte Repräsentation der Erreichbarkeitsmenge

8.2.2 Initialisierung des Fahrzeugzustandes

Zu Beginn der Berechnungen werden zwei neue Grenzen $\rho_{1,1}$ und $\lambda_{1,1}$ instanziiert. Ihnen hinterlegt sind die Anfangszustände entsprechend der Parameterübersicht in Tabelle 8.1.

8.2.3 Prädiktion der Intervallgrenzen

Für die Prädiktion der Grenzen wird das in Kapitel 6.4 vorgestellte diskretisierte Bahnmodell genutzt. Zunächst wird hierzu über Gl. 6.19 die Prädiktionszeit für den Übergang in den kommenden Streifen der x-diskretisierten, intervallbasierten Darstellung berechnet, um dann mittels der Gln. 6.16 bis 6.18 die neuen Zustände y_{k+1} , v_{k+1} und φ_{k+1} zu ermitteln. Die hierfür notwendigen Normal- und die Tangentialbeschleunigungen a_k^n , a_k^t ergeben sich aus der Modellierung gemäß Abbildung 6.8 und den Randbedingungen aus Tabelle 8.1. In Abbildung 8.4 ist ein Beispiel für die Prädiktion der Grenzen zu sehen. Ausgehend von den initialen Grenzen $\rho_{1,1}$ und $\lambda_{1,1}$ sind bereits $n - 1$ Prädiktionen erfolgt und der befahrene Bereich war ausschließlich frei, sodass keine Anpassungen der Grenzen vorgenommen werden mussten. Ziel der dargestellten n -ten Prädiktion sind die potentiellen Grenzen $\rho_{n+1,1}^{pot}$ und $\lambda_{n+1,1}^{pot}$ im anschließenden Streifen $n + 1$.

Bei der Prädiktion kann es dazu kommen, dass sich innerhalb eines Streifens $n + 1$ eine linke Grenze $\lambda_{n+1,m}^{pot}$ und eine rechte Grenze $\rho_{n+1,m+1}^{pot}$ unterschiedlicher Abschnitte m und $m + 1$ überschneiden. Das ist immer dann der Fall, wenn sich nach einem Hindernis die Erreichbarkeitsmenge wieder schließt, da das untersuchte Fahrzeug sowohl links als auch rechts um das Hindernis fahren könnte. Da sich die einzelnen Abschnitte nicht überlappen dürfen, also $\lambda_{n+1,m}^{pot} < \rho_{n+1,m+1}^{pot}$ gilt, werden die betroffenen Grenzen gelöscht. Übrig bleibt ein Abschnitt zwischen $\lambda_{n+1,m+1}^{pot}$ und $\rho_{n+1,m}^{pot}$, wobei die Indizes für die weitere Verarbeitung wieder durchgängig nummeriert werden.

8.2.4 Schnittmengenbildung

Der gesamte Raum, den das Fahrzeug *mit dem Bezugspunkt* im $n+1$ -ten Streifen potentiell einnehmen kann, wird in der Schnittmengenbildung auf mögliche Kollisionen überprüft. Demnach müssen neben den Abschnitten, die zwischen den im Vorhinein prädierten Grenzpaaren $\rho_{n+1,m}^{pot}$ und $\lambda_{n+1,m}^{pot}$ definiert sind, auch weitere berücksichtigt werden, die in vorangehenden oder nachfolgenden Streifen liegen, in denen sich zwar nicht der Bezugspunkt, aber die Kontur des Fahrzeuges befindet:

$$R^{pot} := \bigcup_{k=h}^v R_k^{pot} \quad (8.4)$$

$$R_k^{pot} := \bigcup_{m=1}^{M_k} R_{k,m}^{pot} = \left\{ (x, y, \omega) \left| \begin{array}{l} (x, y) \in \mathbb{R}^2, \quad x_{k-1} \leq x < x_k \\ \rho_{k,m}^{pot} \leq y < \lambda_{k,m}^{pot} \\ \omega \in \Omega \end{array} \right. \right\} \quad (8.5)$$

$$\Omega := \{pot. \text{ kollisionsfrei erreichbar}\}, \quad (8.6)$$

Entlang der x-Diskretisierung werden hierbei alle notwendigen Streifen von hinten nach vorne mit $k = h$ bis $k = v$ beschrieben. Die zweite Menge zur Schnittbildung ist das Ergebnis der Extraktion: alle freien Bereiche in der intervallbasierten Belegungsliste

$$B^{frei} := \bigcup_{k=h}^v B_k^{frei} = \bigcup_{k=h}^v \bigcup_{m=1}^{M_n} B_{k,m}^{frei} \quad \text{mit} \quad (8.7)$$

$$\omega = \{frei\} \times \{dynamisch, statisch\} \quad (8.8)$$

Die Schnittmengenbildung

$$R := R^{pot} \bigcap B^{frei} \quad (8.9)$$

hat zum Ziel, den letztendlich kollisionsfrei befahrbaren Raum im Streifen $n + 1$ zu bestimmen. Bei der Berechnung kann es zu folgenden Möglichkeiten kommen:

- ① **Keine Anpassung notwendig** - Sollte der gesamte potentiell erreichbare Raum frei sein.
- ② **Beide Grenzen löschen** - Sollte es keine Möglichkeit geben, den Streifen $n+1$ kollisionsfrei zu erreichen.
- ③ **Linke Grenze nach rechts verschieben** - In diesem Fall wird die Weiterfahrt durch ein Hindernis auf der linken Seite behindert.
- ④ **Rechte Grenze nach links verschieben** - In diesem Fall wird die Weiterfahrt durch ein Hindernis auf der rechten Seite behindert.
- ⑤ **Zwei neue Grenzen instanzieren** - Das Fahrzeug kann entweder rechts oder links vorbeifahren oder durch eine Lücke in der Mitte fahren.

Bei der Schnittbildung können einfache boolesche Regeln angewendet werden, die den Algorithmus beschleunigen. In der Grafik 8.5 sind sämtliche mögliche Permutationen von Hindernislagen relativ zu den EGO-Grenzen dargestellt. Die grau unterlegten Vorgehensweisen bilden den verdichteten Regelsatz, für den im Anhang D eine Herleitung gegeben wird. Die Visualisierung zeigt den vordersten Streifen $k = v$, in dem der vorderste Teil des Fahrzeuges liegt. Jede einzelne Zeile symbolisiert eine mögliche Stellung eines Hindernisses (rote Kästchen) im Verhältnis zu den Grenzen der Fahrzeugkonturen rechts bzw. links (grauer Hintergrund). Neben den Zeilen ist die daraus folgende Konsequenz für die Grenzen im Bezugslayer $\rho_{n+1,m}^{pot}$ und $\lambda_{n+1,m}^{pot}$ aufgeschlüsselt.

In Abbildung 8.4 ist das Ergebnis einer solchen Schnittmengenbildung zu sehen. In dem dargestellten Beispiel musste die rechte Grenze nach links verschoben werden. Bei jeder Verschiebung einer Grenze - also bei den oben aufgezeigten Möglichkeiten ③ und ④ - muss der zur Grenze hinterlegte Gierwinkel neu ermittelt werden. Hierbei wird der jeweils maximale Wert ermittelt, den dieser an der Stelle (x, y) der neuen Grenze haben kann.

Zusätzlich zur Nutzung einer reduzierten Garnitur an booleschen Regeln wird im implementierten Algorithmus für die Evaluierung der Fahrzeugfläche auf Look-up-tables zurückgegriffen, wodurch langwierige trigonometrische Berechnungen vermieden werden können.

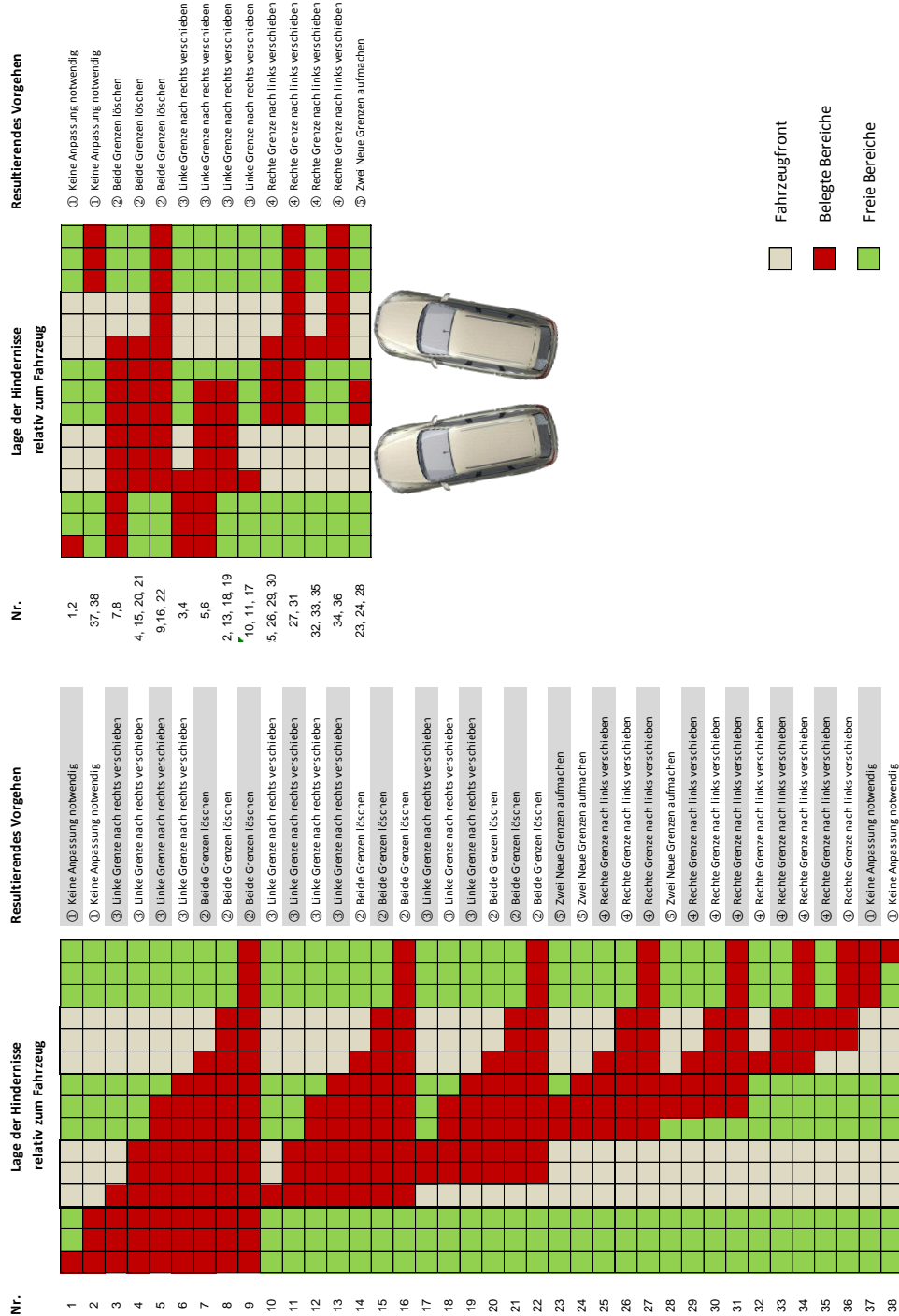


Abbildung 8.5: Möglichkeiten der Schnittmengenbildung, Links: Permutation aller Möglichkeiten, Rechts: Resultierende Möglichkeiten nach einer Verdichtung aller Permutationen - Die systematische Erarbeitung dieser Schnittmengenbildung findet sich im Anhang D.

8.2.5 Test auf Abgeschlossenheit

Sollten nach der Schnittmengenbildung keine Grenzen mehr im Streifen $n + 1$ existieren und wurde bis zu diesem Zeitpunkt auch noch keine seitliche Grenze der maximal möglichen Erreichbarkeitsmenge \hat{R} überschritten, so gilt die ermittelte Erreichbarkeitsmenge R als abgeschlossen. Mathematisch ergibt sich dieser Zusammenhang mit

$$R_{n+1} = \emptyset \quad \wedge \quad R \cap \delta \hat{R} = \emptyset. \quad (8.10)$$

In diesem Fall gilt die Situation als unausweichlich unter den gegebenen dynamischen Randbedingungen, die je nach Evaluierung (Achtenswert, Kritisch, Unvermeidbar) variiert werden (siehe Tabelle 8.1). Die wesentliche Eingriffsvoraussetzung ist damit erfüllt. Seitens der Situationsanalyse werden aus der Menge R zusätzlich die Ausgabewerte entsprechend Tabelle 5.1 ermittelt und an die Verhaltensgenerierung weitergeleitet. In Abbildung 6.5 ist ein Beispiel einer solchen abgeschlossenen Erreichbarkeitsmenge dargestellt.

8.3 *CoBRA-Algorithmus für komplex-dynamisch-statische Interaktionen*

Der im Vorfeld erklärte Kern-Algorithmus wird nun um die Beachtung komplex-dynamisch-statischer Interaktionen erweitert.¹¹⁹ Komplex bezieht sich auf die Anzahl der in die Berechnung einbezogenen dynamischen Verkehrsteilnehmer und deren aufgespanntes Beziehungsgeflecht. So wirkt grundsätzlich die statische Umwelt handlungsbegrenzend für alle Fahrzeuge. Darüber hinaus sollen die dynamischen Objekte untereinander rücksichtsvoll, d.h. unfallvermeidend agieren.

Bei der Berechnung der Erreichbarkeitsmenge werden vom *CoBRA*-Kernalgorithmus Eingangsdaten mit einer Klassifizierung *Frei* oder *Belegt* erwartet. Grundsätzlich ist es hierbei unerheblich, was den Weg versperrt. Es kann sich dabei um den Rand der Fahrbahn, eine aufgemalte Verkehrsinsel oder ein anderes Fahrzeug handeln. Im Folgenden wird diese Eigenschaft genutzt, um auch die Bereiche als *Belegt* zu definieren, die durch andere Verkehrsteilnehmer versperrt werden. Hierfür ist die Kenntnis über das sichere Aufenthaltsgebiet

$$A_{Fzg} := \{(x, y, t) \in \mathbb{R}^3 \mid P(E_{(x,y,t)}) = 1\} \quad \text{mit} \quad (8.11)$$

$$E_{(x,y,t)} := \text{Fahrzeug beansprucht zum Zeitpunkt } t \text{ den Punkt } (x, y) \quad (8.12)$$

¹¹⁹Vgl. auch die im Rahmen dieser Dissertation betreute Arbeit von König (2010)

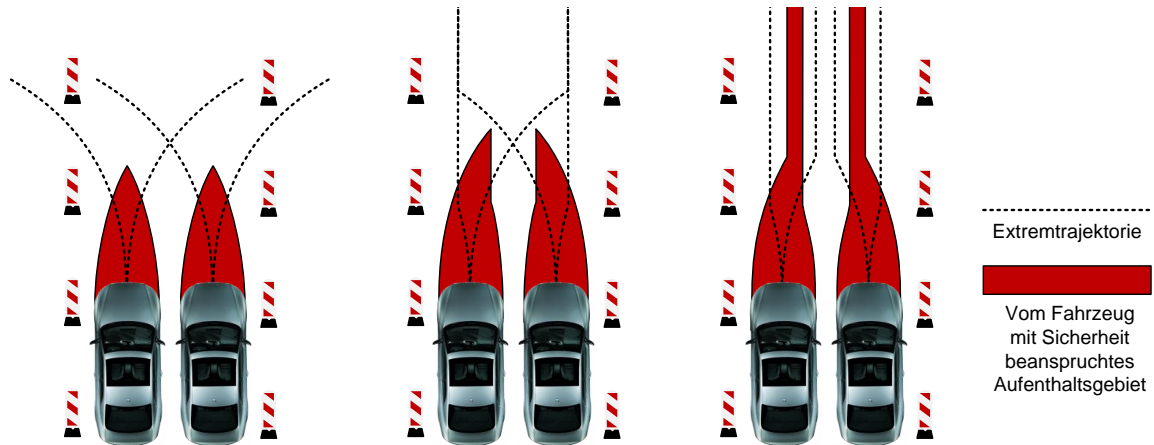


Abbildung 8.6: Extremtrajektorien und resultierende sichere Aufenthaltsgebiete, Links: Ohne Beachtung von Interaktionen, Mitte: Mit rein statischer Interaktion, Rechts: Mit dynamisch-statischer Interaktion

notwendig. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass sich mindestens ein Teil des Fahrzeuges zu dem betrachteten Zeitpunkt t im Bereich (x, y) befindet. Es existiert also keine Trajektorie, die das Fahrzeug bis zu diesem Zeitpunkt vollständig aus diesem Bereich herausführt.

In Abbildung 8.6 sind auf der linken Seite die resultierenden sicheren Aufenthaltsgebiete zweier Fahrzeuge dargestellt. Die zugrunde gelegten Extremtrajektorien berücksichtigen keine Interaktion mit der Umwelt und gehen davon aus, dass sich beide Fahrzeuge auf einer freien Fläche kollisionsfrei bewegen können. Hierbei wird ein wesentlicher Nachteil der sicheren Aufenthaltsgebiete deutlich: Ab einer Prädiktionsdauer t_{PH} existieren keine Punktpaare (x, y) mehr, für die $P(E_{(x,y,t)}) = 1$ gilt. Das heißt, dass ab diesem Zeitpunkt zwei Trajektorien existieren, an deren Ende sich die prädizierten Fahrzeuge nicht mehr überlappen. Somit kann auf kein sicher belegten Bereich geschlossen werden, der für andere Verkehrsteilnehmer ein Hindernis darstellt. Der Zeitpunkt des Verschwindens $t_{PH,Fzg}$ wird im Folgenden auch Prädiktionshorizont genannt.

Aus der Darstellung im linken Teil der Abbildung 8.6 ist erkennbar, dass die zugrunde gelegten Extremtrajektorien für die Fahrzeuge nicht kollisionsfrei fahrbar sind. Um den Prädiktionshorizont zu erweitern und somit auch ein entfernteres Stauende als Hindernis interpretieren zu können, ist es notwendig, die Interaktionen zwischen den dynamischen Objekten und der statischen Umwelt zu berücksichtigen. Das Ergebnis einer Berechnung auf dieser Basis ist in der Mitte der Abbildung 8.6 zu sehen. Hierbei kommt es zu einer Erweiterung der Prädiktionshorizonte beider involvierten Fahrzeuge. Wird zudem die bidirektionale Interaktion zwischen beiden beachtet, dann ergeben sich sichere Aufenthaltsgebiete, wie sie auf der rechten Seite der Grafik 8.6 gezeigt werden. Das sichere Aufenthaltsgebiet kann dadurch wesentlich erweitert werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das sichere Aufenthaltsgebiet (x, y, t) aus Vereinfachungsgründen als Projektion auf

die Fläche $(x, y) \forall t$ dargestellt ist. Neben der räumlichen Erweiterung des Prädiktionshorizontes ergibt sich auch eine - hier nicht gezeigte - zeitliche Ausweitung.

Bei der Erweiterung des Algorithmus auf die Beachtung komplex-dynamischer Interaktionen ergibt sich ein Henne-Ei-Problem: Zunächst muss das sichere Aufenthaltsgebiet eines Fahrzeuges bekannt sein, bevor sich andere an diesem orientieren können. Soll dieses Fahrzeug aber ebenfalls auf andere Rücksicht nehmen, so kann der sichere Aufenthaltsbereich nicht separat bestimmt werden. Wendet man beispielsweise ein Einzeltrajektorienverfahren an, das alle möglichen Permutationen von N_{Trj} betrachteten Trajektorien von N_{Obj} Objekten berücksichtigen soll, so müssen

$$N_{gesamt} \geq N_{Kombinationen} \cdot N_{Iterationen} = N_{Obj} \cdot N_{Trj}^2 \cdot N_{Obj} \cdot N_{Trj} \quad (8.13)$$

Berechnungen auf Überschneidung durchgeführt werden. Hierbei müssen alle möglichen Kombinationen $N_{Kombinationen}$ sooft iteriert werden, bis sich die möglichen gegenseitigen Beeinflussungen eingeschwungen haben. Bei fünf Fahrzeugen und 5 Objekten (statisch wie auch dynamisch) ergeben sich beispielsweise mindestens 25 Millionen Kombinationsprüfungen. Ein solches Vorgehen ist für ein Sicherheitssystem nicht akzeptabel. Im Folgenden wird daher eine Methode vorgestellt, die zum einen durch die Bestimmung von bidirektionalen Interaktionsgruppen die Komplexität reduziert und zum anderen durch die geschickte Berechnung von linken und rechten Extremtrajektorien vollständig auf ein iteratives Vorgehen über alle Fahrzeuge hinweg verzichten kann. Dieser Mechanismus wird mithilfe des Ablaufes, der in Abbildung 8.7 dargestellt ist, beschrieben.

8.3.1 Bestimmung bidirektionaler Interaktionsgruppen

Die große Vielfalt an Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern im täglichen Verkehr lässt sich in drei Gruppen aufteilen: unidirektionale, bidirektionale und solche, die keine Beeinflussung mit sich bringen. Ziel einer entsprechenden Zuordnung ist die Bildung von Fahrzeuggruppen, innerhalb derer die Gruppenmitglieder bidirektional interagieren. Die Gruppen selbst beeinflussen sich entweder unidirektional oder gar nicht. In Abbildung 8.8 ist das Ergebnis einer Gruppenbildung zu sehen. Hierbei interagieren die Fahrzeuge in Gruppe ① bidirektional. Das erste Fahrzeug im rechten Fahrstreifen wird durch niemanden eingeschränkt und dessen Nachfolger orientiert sich nur am Vordermann. Beide werden somit den separaten Gruppen (② und ③) zugeordnet, da keine bidirektionalen Zusammenhänge vorliegen. Im Folgenden werden die Regeln für die Bestimmung bi- und unidirektionaler Beziehungen beschrieben. Trifft keine der Regeln zu, so existiert keine Beeinflussung. Da in diesem Fall das sichere Aufenthaltsgebiet schrumpft, ist mit konservativen Regeln gewährleistet, dass nur in sicheren Fällen der Aktionsraum des EGO durch andere Fahrzeuge eingeschränkt wird.

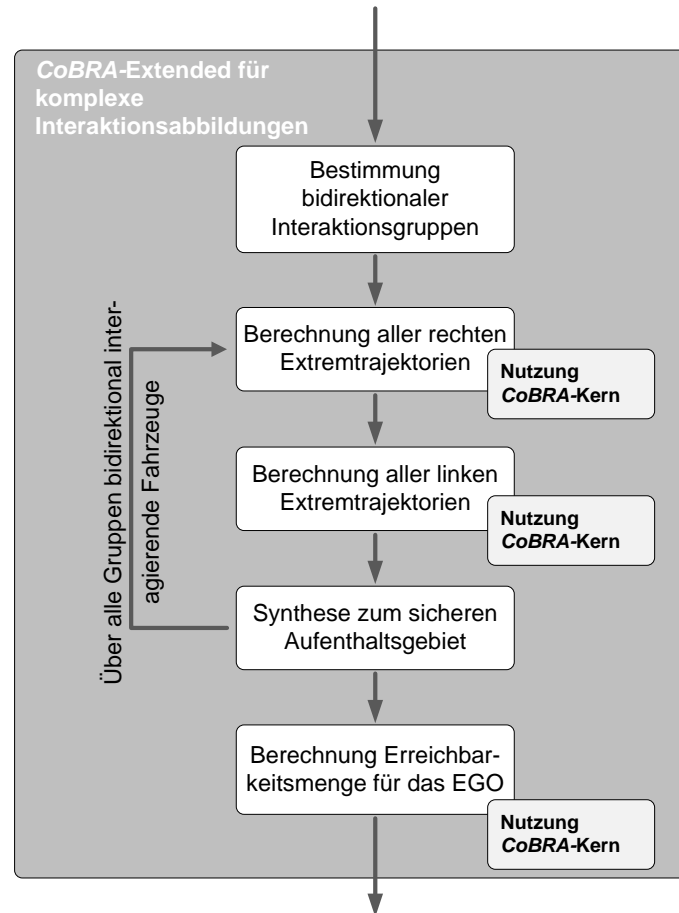


Abbildung 8.7: Ablauf zur Berechnung der sicheren Aufenthaltsgebiete unter Beachtung dynamischer wie statischer Interaktionen

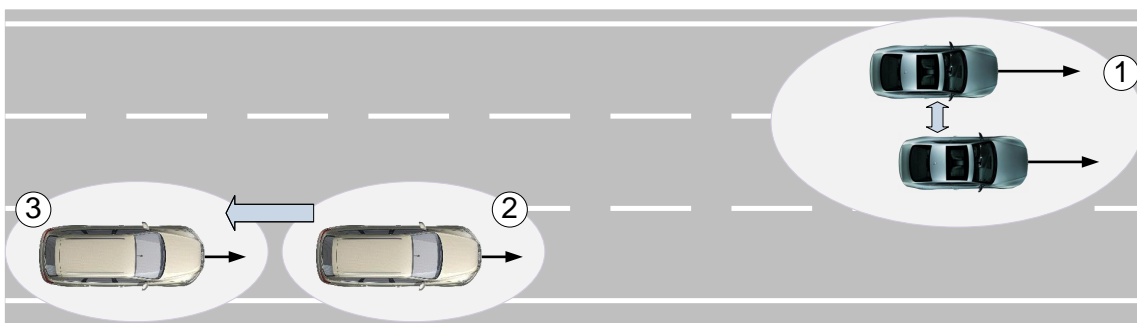


Abbildung 8.8: Interaktionstypen: ① ist eine bidirektionale Interaktionsgruppe, innerhalb der sich beide Fahrzeuge gegenseitig beeinflussen. Das Fahrzeug in Gruppe ② wird von niemandem beeinflusst und das Fahrzeug in Gruppe ③ orientiert sich am Vordermann.

Unidirektionale Interaktion

Im fließenden Verkehr ist die einseitige Beeinflussung durch den Vordermann der bestimmende Faktor. Die StVO fordert zur Vermeidung von Auffahrunfällen:

Der Abstand von einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter ihm gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird (StVO §4(1)).

Dies entspricht - abgesehen von Einzelfällen - der Alltagserfahrung. Nur bei hohen Geschwindigkeiten und auf dem linken Fahrstreifen deutscher Autobahnen bringen aggressive Fahrer den Vordermann durch Lichthupe, Blinken und verkehrswidriges, dichtes Auffahren zu einem Spurwechsel. Diesen Sonderfall auslassend, wird folgende Regel für die Klassifikation als unidirektionale Beeinflussung aufgestellt:

$$|y_A - y_B| < \Delta y_{\text{Schwellwert}} \quad \wedge \quad v_{x,B} > v_{x,A} \quad (8.14)$$

y_A bzw. y_B bezeichnen die laterale Ablage zweier Fahrzeuge relativ zur Ausrichtung des EGO, $v_{x,B}$ bzw. $v_{x,A}$ deren Geschwindigkeiten in Longitudinalrichtung relativ zum EGO. Bei einer Erweiterung des Eingangswissens um eine Fahrstreifenerkennung oder um eine Fahrschlauchdetektion für Fremdfahrzeuge kann die Regel erweitert werden, ohne die Funktionsweise des *CoBRA*-Algorithmus anpassen zu müssen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden solche Fragestellungen nicht adressiert. Für die Abschätzung der Zugehörigkeit zu einem Fahrstreifen wurde deshalb auf die y-Ablage zurückgegriffen.

Bidirektionale Interaktion

Während unidirektionale Beziehungen vor allem im Längsverkehr gegeben sind, treten bidirektionale Beeinflussungen im Wesentlichen beim Spurwechsel und beim dichten Nebeneinanderfahren auf. Zum Spurwechsel schreibt die StVO Folgendes vor:

Wer zum Überholen ausscheren will, muss sich so verhalten, dass eine Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs ausgeschlossen ist (StVO §5(4)).

Ist der Zielfahrstreifen nicht frei bzw. nähert sich ein Fahrzeug mit hoher Differenzgeschwindigkeit, so ist beiden Fahrzeugen ein Fahrstreifenwechsel nicht kollisionsfrei möglich. Sie beeinflussen sich gegenseitig. Anders als beim Fahrstreifenfolgen ist also ggf. auch der vorausfahrende (Index A) bzw. nachfolgende (Index B) Verkehr relevant. Für die Zusammenführung in eine Gruppe wird daraus folgende Regel abgeleitet:

$$|y_A - y_B| > \Delta y_{\text{Schwellwert}} \quad \wedge \quad [v_{x,B} > v_{x,A} \quad \vee \quad |x_A - x_B| < \Delta x_{\text{Schwellwert}}] \quad (8.15)$$

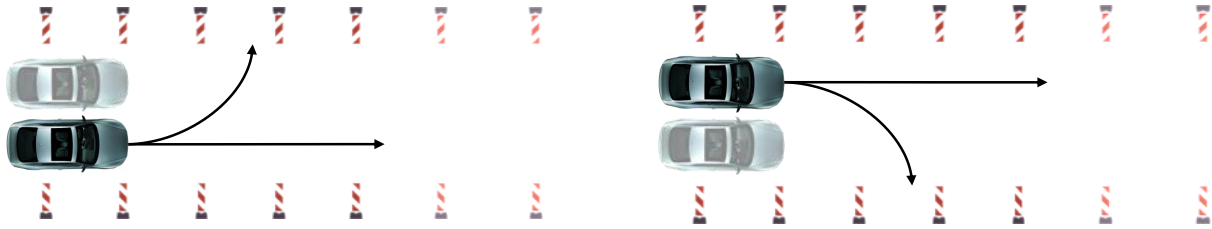
8.3.2 Berechnung linker und rechter Extremtrajektorien

Das sichere Aufenthaltsgebiet kann mit Hilfe der kollisionsfrei befahrbaren Extremtrajektorien eines Fahrzeuges ermittelt werden. Aus einer **rechten** Extremtrajektorie kann dabei auf die **linke** Begrenzung des sicheren Aufenthaltsgebietes geschlossen werden. Der Kern des CoBRA-Algorithmus ist in der Lage, neben dem Aufenthaltsgebiet auch diese Extremtrajektorien zu ermitteln. Aus diesem Grund wird der Kernalgorithmus zweimal pro Fahrzeug angewendet. Im ersten Durchgang werden alle rechten Trajektorien aller Fahrzeuge einer Gruppe bestimmt, beim zweiten Mal werden die linken Trajektorien aller Fahrzeuge einer Gruppe berechnet. Sämtliche statischen und dynamischen Interaktionen können so berücksichtigt werden, ohne dass weitere Iterationen notwendig sind. Einzige Voraussetzung ist, dass für die Berechnung der **rechten** Extremtrajektorien bei dem Fahrzeug begonnen wird, das sich am weitesten **rechts** befindet. Die gleiche Regel - nur in inverser Form - trifft für die Ermittlung der linken Trajektorien zu.

Abbildung 8.9 zeigt eine Visualisierung dieses schrittweisen Vorgehens. Auf der linken Seite werden die linken Grenzen der sicheren Aufenthaltsgebiete gebildet. Auf der rechten Seite deren rechte Pendanten. Da die Vorgehensweise für beide Seiten identisch ist, wird im Folgenden nur der linke Teil der Abbildung 8.9 näher beschrieben. Im Schritt (a) ermittelt der CoBRA-Algorithmus die Extremtrajektorien des rechten Fahrzeuges. Die rechte Extremtrajektorie orientiert sich hierbei bereits eng an der baulichen Randbegrenzung, die linke Seite nimmt noch keine Rücksicht auf das Nachbarfahrzeug. In (b) werden die Extremtrajektorien für das linke Fahrzeug bestimmt. Da hier bereits die linke Grenze des sicheren Aufenthaltsbereiches des rechten Fahrzeuges bekannt ist, berücksichtigt der Algorithmus sowohl die Randbebauung als auch das Nachbarfahrzeug. In Schritt (c) ist das Ergebnis visualisiert: die linken Grenzen der sicheren Aufenthaltsgebiete beider Fahrzeuge.

Der Anschaulichkeit halber sind die Darstellungen zweidimensional und beschreiben das Aufenthaltsgebiet nur in der (x, y) Ebene. In dem gegebenen Beispiel - der Fahrt zweier Fahrzeuge nebeneinander mit der gleichen Geschwindigkeit - ist die zeitliche Ausdehnung des sicheren Aufenthaltsgebietes auch nicht der entscheidende Faktor. Der Algorithmus selbst berücksichtigt bei den Berechnungen natürlich auch den zeitlichen Aspekt im Raum (x, y, t) .

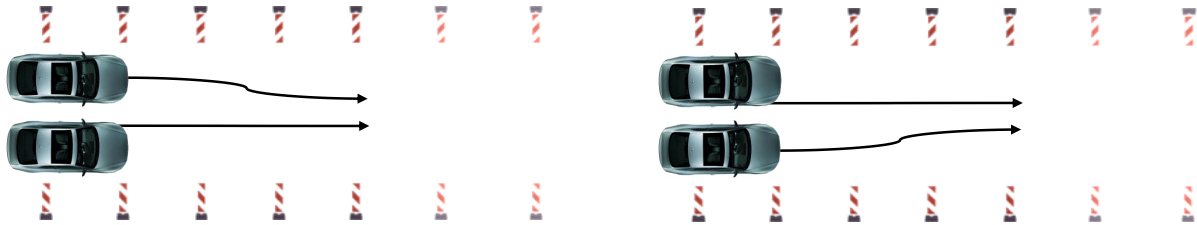
Für die Berechnung der gegenseitigen Einflussnahme ist neben der angenommenen Fahrzeugbreite und -länge auch der Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen ergebnisrelevant. Hierunter fallen sowohl der laterale Abstand in Metern als auch der longitudinale Sicherheitsabstand in Form einer Zeitlücke. In der in Kapitel 7 beschriebenen Studie wurde für Tordurchfahrten ein Mindestsicherheitsabstand von 5% in Bezug auf die eigene Fahrzeugbreite ermittelt. Dieser Abstand wird im Folgenden auch bei dynamischen Umgebungen verwendet. Des Weiteren ist aus Untersuchungen zur subjektiven Gefahreinschätzung bei Fahrstreifenwechseln von Kodaka u. a. (2003) bekannt, dass alle Probanden



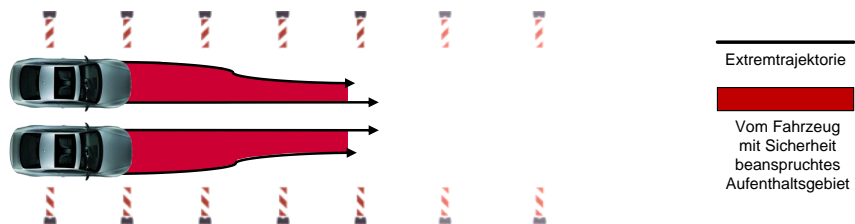
(a) Erreichbarkeitsmenge und damit linke bzw. rechte Extremtrajektorie für das erste Fahrzeug der Gruppe bestimmen, beginnend beim ganz rechten bzw. ganz linken Fahrzeug



(b) Erreichbarkeitsmenge und damit linke bzw. rechte Extremtrajektorie für das zweite Fahrzeug der Gruppe bestimmen, unter Berücksichtigung der linken bzw. rechten Grenze des resultierenden sicheren Aufenthaltsgebietes des ersten Fahrzeuges



(c) resultierende rechte bzw. linke Grenzen des sicheren Aufenthaltsbereiches aller Fahrzeuge der Gruppe



(d) Synthese zu beidseitig abgeschlossenen sicheren Aufenthaltsgebieten

Abbildung 8.9: Iterationslose Synthese des sicheren Aufenthaltsgebietes aller Fahrzeuge einer Gruppe

unterhalb einer Zeitlücke von $t_{TTC} = 1s$ die Situation als „*considerable dangerous*“ einschätzen. Dieser Wert wird daher ohne weitere eigene Untersuchungen übernommen.

8.3.3 Synthese zum sicheren Aufenthaltsgebiet

Bei der Synthese zum sicheren Aufenthaltsgebiet wird aus den gewonnenen Extremtrajektorien der Rand des sicheren Aufenthaltsgebietes A_{Fzg} eines jeden Fahrzeuges bestimmt. Hierbei werden neben der Dynamik auch die Länge und Breite des Objektes berücksichtigt. Abbildung 8.9 (d) zeigt das Resultat der Berechnungen.

8.3.4 Bearbeitungsreihenfolge

Für die Generierung der sicheren Aufenthaltsgebiete spielt die Reihenfolge der Bearbeitung der Gruppen eine wesentliche Rolle, führt diese doch zu einer Vereinfachung des gesamten Algorithmus. Da sich Gruppen untereinander entweder nur unidirektional oder gar nicht beeinflussen, muss die Reihenfolge so ausgelegt sein, dass sich eine gegebene unidirektionale Rücksichtnahme darin widerspiegelt. Daher werden zunächst alle unbeflussten Gruppen berechnet. Die Reihenfolge innerhalb dieser Bearbeitung spielt keine Rolle. Als Nächstes werden die Gruppen von vorn nach hinten bearbeitet. Der Grund dafür ist die Regel, dass sich die einseitige Beeinflussung aufgrund des Folgeverkehrs ergibt. Innerhalb der Gruppen wird bei der Berechnung der linken und rechten Extremtrajektorien darauf geachtet, dass die Fahrzeuge von links bzw. rechts an entlang ihrer lateralen Ordnung behandelt werden. Dies stellt sicher, dass sich die Fahrzeuge untereinander beeinflussen. Bei allen Berechnungen finden grundsätzlich bereits bekannte sichere Aufenthaltsgebiete anderer Gruppen Berücksichtigung.

8.3.5 Berechnung der Erreichbarkeitsmenge für das EGO

An diesem Punkt des CoBRA-Algorithmus für komplexe Interaktionsabbildungen sind die sicheren Aufenthaltsgebiete aller Fremdfahrzeuge bekannt. Für die Berechnung der Erreichbarkeitsmenge des EGO fließen diese als nicht befahrbare Hindernisse in die Berechnungen ein. Somit wirken alle anderen Fahrzeuge unidirektional auf das EGO ein. Grundsätzlich kann auch das EGO mit anderen dynamischen Objekten bidirektional interagieren. Hierzu wird es als weiteres Fahrzeug in die Gruppenbildung eingebracht und in den Berechnungen zu den sicheren Aufenthaltsgebieten berücksichtigt. Damit entfällt die separate Berechnung der Erreichbarkeitsmenge des EGO, da diese bereits im Zuge der Berechnung linker und rechter Extremtrajektorien ermittelt wird. Eine solche Behandlung bringt vor allem dann Vorteile, wenn Nachbarfahrzeuge des EGO sich auch an diesem orientieren sollen.

9 Ergebnisse auf der Basis von Realszenarien

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Nutzung des *CoBRA*-Algorithmus in einem Versuchsträger auf Basis von Realdaten gezeigt. Ausgangspunkt bilden die vier Szenarien, die in Kapitel 5.4 auf den Seiten 65ff beschrieben wurden:

Das **Szenario I - „Stauende“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende mit der Möglichkeit nach rechts auszuweichen. Die Ergebnisse aus diesem Szenario werden einmal als **Szenario Ia** mit einem **aufmerksamen** und einmal als **Szenario Ib** mit einem **unaufmerksamen** Fahrer gezeigt. (vgl. Abb. 5.5, Seite 67)

Das **Szenario II - „Geschlossene Gasse“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, das sich in einer Gasse befindet. (vgl. Abb. 5.6, Seite 67)

Das **Szenario III - „Geöffnete Gasse“** zeigt ebenfalls die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, wobei während des Auffahrens noch einige Zeit die Möglichkeit existiert, durch eine Lücke in der Randbebauung nach rechts auszuweichen. (vgl. Abb. 5.7, Seite 67)

Das **Szenario IV - „Bewegtes Stauende“** zeigt die Auffahrt auf ein stehendes Stauende, wobei der potentielle Ausweichweg nach rechts durch ein langsam fahrendes Fahrzeug verhindert wird. (vgl. Abb. 5.8, Seite 67)

Für das Szenario IV wird zusätzlich eine Simulation des Bremsverhaltens mit dem erweiterten *CoBRA*-Algorithmus vorgestellt, um deren Ergebnisse mit den Resultaten vergleichen zu können, die unter Verwendung des einfach statischen *CoBRA*-Algorithmus bei der Datenaufnahme erzielt wurden. Den Abschluss bildet eine Diskussion der Ergebnisse.

9.1 Ergebnisse aus Szenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“

Die Abbildungen 9.1 und 9.2 zeigen die Ergebnisse im Zeitverlauf, wobei die erste Abbildung eine Übersicht gibt, während in der zweiten auf die relevanten Zeitpunkte um $t = 10,2s$ vergrößert wird. Der Marker **0** zeigt auf den Zeitpunkt $t_{Achtenswert} = 9,745s$

des Erkennens der Ausweichlosigkeit unter der Parametrierung *Achtenswert*, die für das Auslösen eines akustischen Warnbongos verwendet wird. Das Fahrzeug ist zu diesem Zeitpunkt $d_{Achtenswert} = 38,4m$ vom Stauende entfernt.¹²⁰ Der Distanzwert verringert sich mit der Annäherung an das aus drei Fahrzeugen bestehende Hindernis, wobei er kurzzeitig einbricht. In diesem konkreten Fall führten Ungenauigkeiten im Sensor dazu, dass die Kanten der Fahrzeuge sich nicht deutlich genug auf der Belegungskarte akkumulierten. Im Zuge dessen erkannte der *CoBRA*-Algorithmus kurzzeitig eine Lücke, die der Fahrer vermeintlich hätte durchfahren können. Dies ist grundsätzlich ein gewünschtes Verhalten des Situationsanalysealgorithmus, der entsprechend breite Gassen als durchfahrbar erkennen soll.

Der Marker 1 verweist auf den Zeitpunkt $t_{Kritisch} = 10,085s$, zu dem ein unkritisches Ausweichmanöver nicht mehr möglich ist. Das Fahrzeug ist hierbei $d_{Kritisch} = 32,0m$ von den Hindernissen entfernt. Der Zustandsautomat der Verhaltensgenerierung fordert von der Bremse nach einem Vertrauenszyklus eine Verzögerung von $a_{Soll} = -3\frac{m}{s^2}$ an, was in den Diagrammen mit 2 markiert ist. Zum selben Zeitpunkt $t_{Unvermeidbar} = 10,144s$ wird die Unausweichlichkeit der Situation erkannt, was eine notwendige Voraussetzung für das Auslösen der automatischen Vollbremsung darstellt (Marker 3). Allerdings ist mit $d_{Unvermeidbar} = 30,4m$ noch mehr Abstand zum Hindernis vorhanden als für eine Ziel-Vollbremsung nötig. Daher wird erst bei der Markierung 4 von der Verhaltensgenerierung eine Vollbremsung mit $a_{Soll} = -11\frac{m}{s^2}$ angefordert. Dieser Wert spiegelt den maximalen Verzögerungswert wieder, der bei Tests mit einem Audi A8 erreicht wurde und stellt sicher, dass die maximal mögliche Verzögerung durch das Bremssystem gestellt wird. 0,34s nach der ersten Bremsanforderung beginnt das Fahrzeug zu entschleunigen und ca. eine halbe Sekunde später wird die maximal mögliche Verzögerung erreicht. Das Schwingen der gemessenen Verzögerung im Stillstand spiegelt nicht den realen Verlauf wider - vielmehr ist die benutzte (Serien-)Eigensensorik nicht für eine solche Extremsituation ausgelegt.

Die Abbildung 9.4 visualisiert die Ein- und Ausgangsdaten der Situationsanalyse zu den Zeitpunkten des Erkennens der Ausweichlosigkeit in einer Draufsicht, wobei zusätzlich die Belegungskarte als Ausgangsbasis der funktionsspezifischen Extraktion unterlegt ist. Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Kanten der drei Fahrzeuge erst mit der Zeit in der Belegungskarte als Hindernisse akkumulieren und somit erst mit abnehmender Entfernung zum Hindernis als solche erkannt werden. Den Eingangsdaten der Situationsanalyse (rot, grün, grau) ist die interne Repräsentation des unfallfrei befahrbaren Raumes überlagert. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Darstellung immer auf den *Bezugspunkt* des EGO bezieht, der sich auf der Mitte der Hinterachse befindet. Dies führt zu dem im Bild sichtbaren Abstand zur Randbebauung und den aufblasbaren Fahrzeugattrappen vorn.

Eine ähnliche Darstellung bieten die Bilder in Abbildung 9.5. Hierbei sind die computer-eigenen Repräsentationen in das Videobild projiziert. In den Zeilen sind die Darstellungen

¹²⁰Gemessen zwischen der Vorderkante des EGO und der letztmöglichen Kollisionskante der beliebig strukturierten Hindernisse

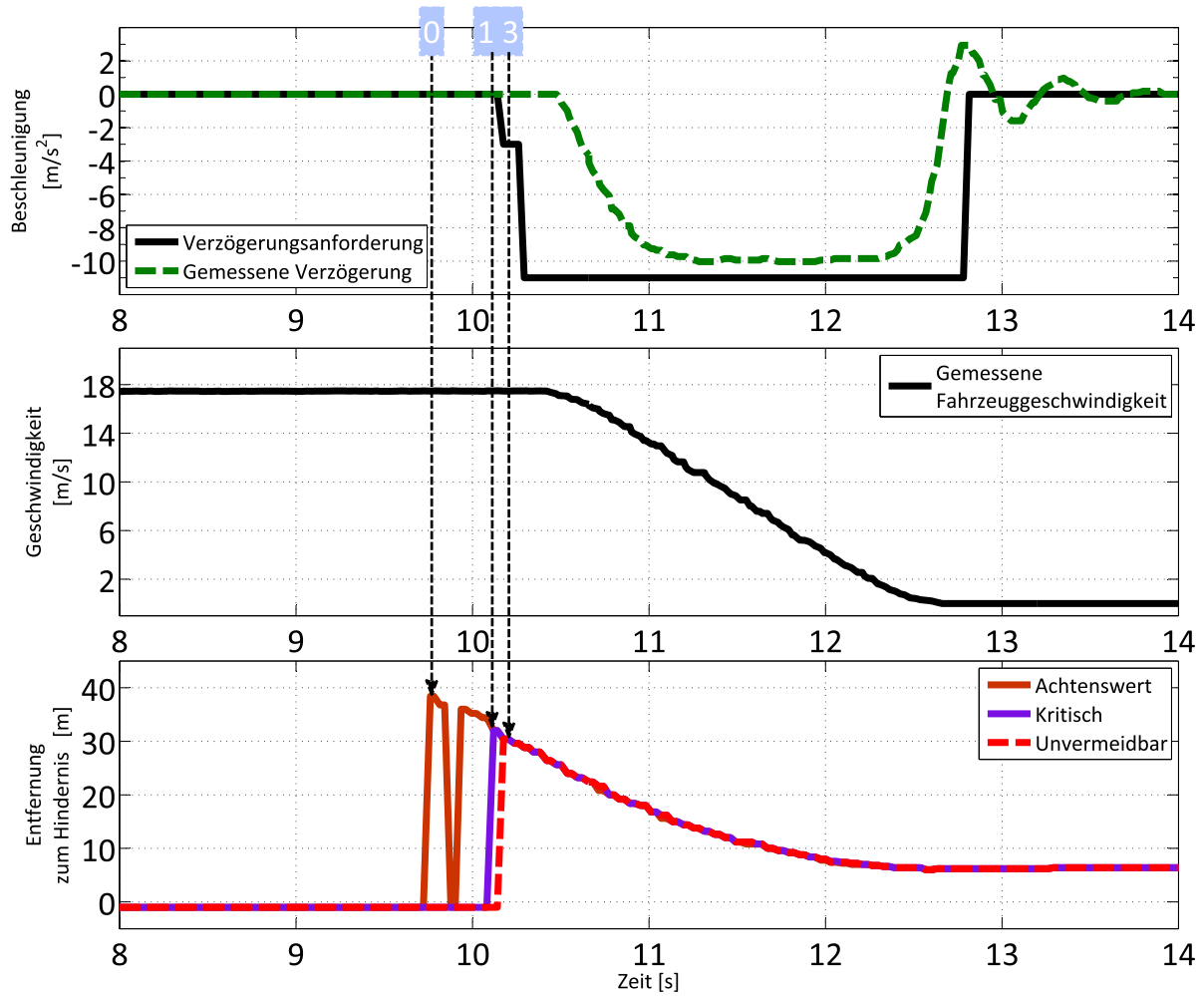


Abbildung 9.1: Beschleunigung, Geschwindigkeit und detektierte Entfernung zum Hindernis über den gesamten Gefahrenbremsvorgang für Szenario Ia - „Stauende und aufmerksamer Fahrer“, Die Marker x werden im Text für Erläuterungen aufgegriffen.

jeweils zu den Zeitpunkten $t_{\text{Achtenswert}}$, t_{Kritisch} sowie $t_{\text{Unvermeidbar}}$ ausgeführt, in den Spalten finden sich die unterschiedlichen Ausprägungen der Parametrierungen *Achtenswert*, *Kritisch* und *Unvermeidbar* wieder. In der oberen Reihe ist erkennbar, wie sich zum Zeitpunkt $t_{\text{Achtenswert}}$ für die beiden anderen Ausprägungen noch Ausweichmöglichkeiten um die drei Fahrzeugattrappen herum bieten. In der mittleren Reihe ganz rechts kann das EGO zwar nicht mehr um alle drei Fahrzeuge fahren, aber aufgrund der noch nicht akkumulierten Hecks der Luftautos vermeintlich zwischen diesen hindurchfahren.

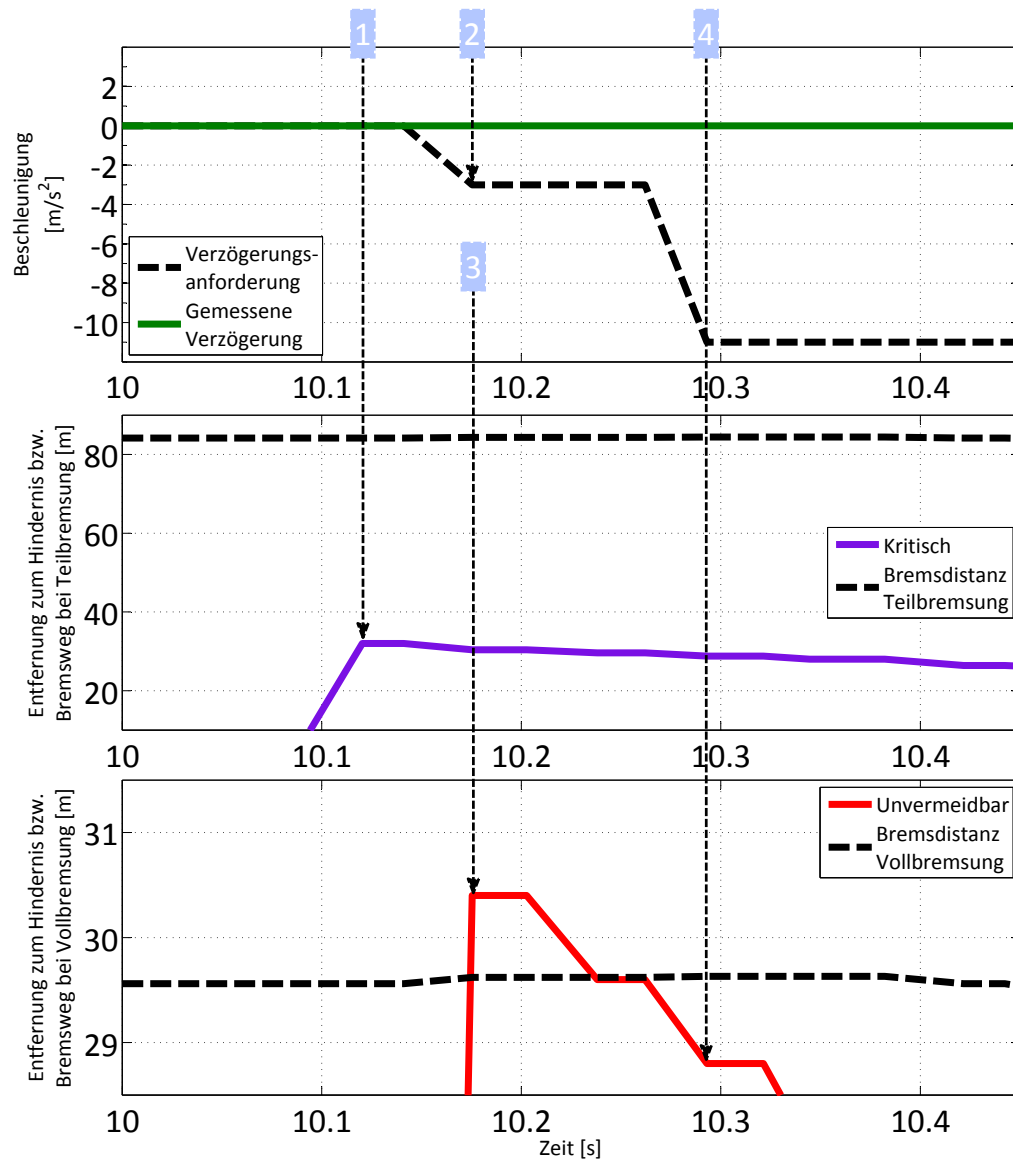


Abbildung 9.2: Beschleunigung und detektierte Entfernungen zum Hindernis in der Phase der Auslösung der aktiven Gefahrenbremsung für Szenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“. Die Marker x werden im Text für Erläuterungen aufgegriffen.

9.2 Ergebnisse aus Szenario Ib - „Stauende mit unaufmerksamem Fahrer“

Für dieses Szenario wurden exakt dieselben Daten verwendet wie für das Szenario Ia - nur der Aufmerksamkeitszustand des Fahrers wird mit unaufmerksam statt mit aufmerksam angenommen. Das hat zur Folge, dass der *CoBRA*-Algorithmus für einen Zeitraum von einer bzw. einer halben Sekunde davon ausgeht, dass der Fahrer die eingeschlagene Bahn nicht ändern wird (siehe Tabelle 8.1, Seite 98). In der Abbildung 9.3 werden im oberen Teil die Ergebnisse der Szenarien Ia und Ib gegenübergestellt. Im unteren Teil sind die Ergebnisse der Situationsanalyse abgebildet. Die Marker kennzeichnen dieselben Zeitpunkte wie die in den Abbildungen 9.1 und 9.2: Bei **0**, zum Zeitpunkt $t_{Achtenswert} = 9,271s$, wird die Unausweichlichkeit in der Parametrierung *Achtenswert* erkannt (vgl. Szenario Ia $t_{Achtenswert} = 9,745s$). Bei **1**, also zum Zeitpunkt $t_{Kritisch} = 9,637s$, erkennt die Situationsanalyse in der Ausprägung *Kritisch* die Unausweichlichkeit (Vgl. Szenario Ia $t_{Kritisch} = 10,085s$) und die Funktion löst eine Teilbremsung aus (Marker **2**, Abbildung 9.2). Diese ist in diesem Szenario deutlich ausgeprägter als im Vergleichsszenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“. Bei **3**, das heißt zum Zeitpunkt $t_{Unvermeidbar} = 10,12s$, kommt die Situationsanalyse zu der Erkenntnis, dass auch ein Notausweichen nicht unfallfrei bleiben wird (vgl. Szenario Ia $t_{Unvermeidbar} = 10,144s$). Der Marker **4** verweist auf die daraufhin angeforderte Vollverzögerung. Die Unausweichlichkeit wird somit in allen drei Ausprägungen *Achtenswert*, *Kritisch* und *Unvermeidbar* früher erkannt, wobei das Delta bei den ersten beiden ungefähr der zusätzlichen Totzeit $t_1 = 500ms$ entspricht ($\delta t_{Achtenswert} = 474ms$, $\delta t_{Kritisch} = 448ms$, $\delta t_{Unvermeidbar} = 24ms$). In der Ausprägung *Unvermeidbar* führt die späte Akkumulation der Kante des mittleren Fahrzeuges zu einer deutlich späteren Einstufung als Hindernis. Allerdings würde die längere Teilbremsung in diesem Szenario dazu führen, dass die Wahrnehmung mehr Zeit hätte, die Umgebung deutlicher zu sensieren.

Für die Abbildungen 9.3 sowie 9.6 gelten die gleichen Erläuterungen, wie sie bereits für die auf der gegenüberliegenden Seite abgedruckten Bilder 9.4 und 9.6 gegeben wurden. Deutlich erkennbar ist die ausgeprägte Phase der Totzeit für den unaufmerksamen Fahrer, in der angenommen wird, dass kaum Lenkwinkeländerungen initiiert werden.

9.3 Ergebnisse aus den Szenarien II und III - „Geschlossene und geöffnete Gasse“

Die Ergebnisse aus den Szenarien II - „Geschlossene Gasse“ und III - „Geöffnete Gasse“ werden im Folgenden vergleichend dargestellt, da der sich ergebende Unterschied die Leistungsfähigkeit des in dieser Dissertation vorgestellten *CoBRA*-Algorithmus demonstriert.

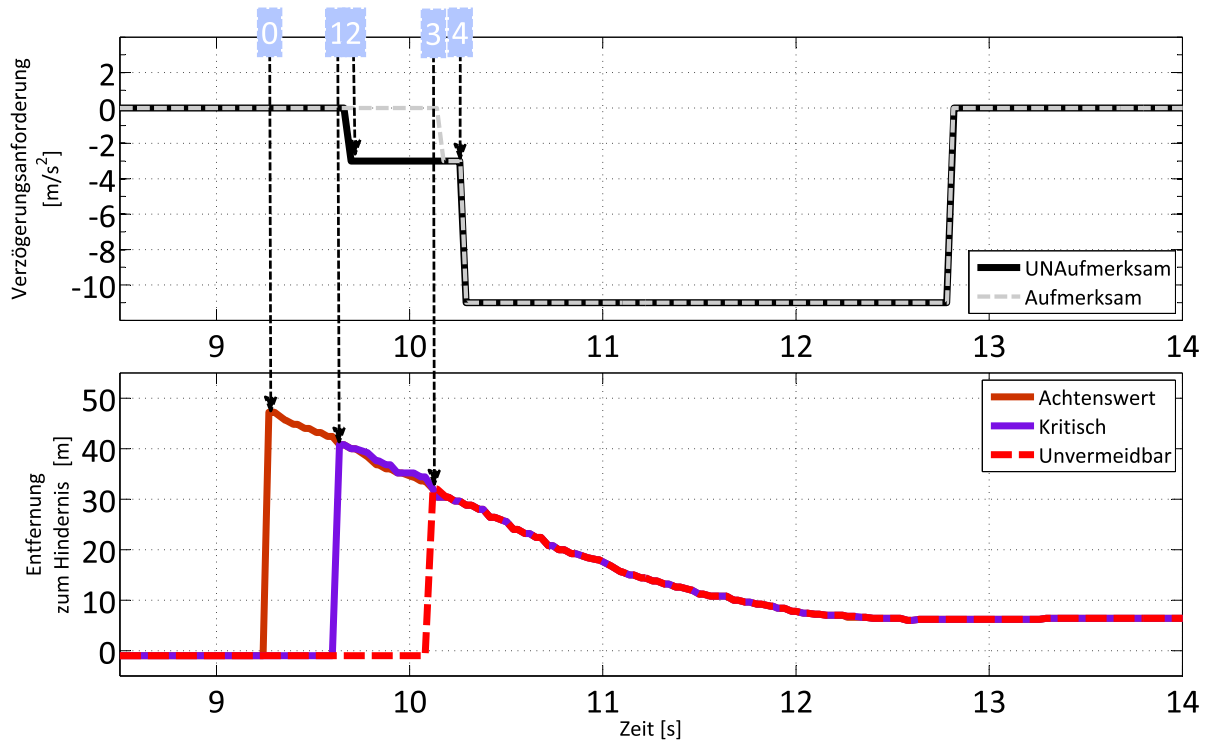


Abbildung 9.3: Beschleunigung, Geschwindigkeit und detektierte Entfernung zum Hindernis über den gesamten Gefahrenbremsvorgang für Szenario Ib - „Stauende mit unaufmerksamem Fahrer“. Die Marker x werden im Text für Erläuterungen aufgegriffen.

Beide Szenarien unterscheiden sich durch zwei fehlende Baken in der Randbebauung, wodurch eine mögliche Ausfahrt und damit ein möglicher Ausweichweg verschlossen bzw. geöffnet wird. Einzeltrajektorienverfahren hätten im Szenario III - „Geöffnete Gasse“ Schwierigkeiten, die offene Lücke sicher zu finden. Für die Auswertung wird die Ausprägung *Achtenswert* ausgeblendet, um sich auf die für die Bremsung relevanten Elemente *Kritisch* und *Unvermeidbar* fokussieren zu können. In Abbildung 9.8 sind die Analyseergebnisse des *CoBRA*-Algorithmus dargestellt. Im Falle einer geschlossenen Gasse detektieren beide Ausprägungen zum selben Zeitpunkt $t_{Kritisch} = t_{Unvermeidbar} = 17,9s$ die Abgeschlossenheit der Situation. Mit einem Abstand von $d_{Kritisch} = d_{Unvermeidbar} = 68,0m$ ist hierbei noch genug Platz, um theoretisch aus einer Geschwindigkeit von $v_{EGO} = 132 \frac{km}{h}$ bis in den Stillstand zu bremsen.¹²¹ Dies entspricht auch den Grenzerfahrungen aus zahlreichen Testfahrten in diesem Szenario. Während bei der Einfahrt in die geschlossene Gasse die Dynamikannahmen keine große Rolle spielen, zeigt sich im Szenario III im unteren Teil der Grafik, dass die Möglichkeit, rechts vorbeizufahren zweistufig je nach Ausprägung wegfällt. Erst zu den Zeitpunkten $t_{Kritisch} = 18,73s$ bzw. $t_{Unvermeidbar} = 19,5s$ wird erkannt,

¹²¹ Auf Basis der Formel 8.1 von Seite 97

9.3 Ergebnisse aus den Szenarien II und III - „Geschlossene und geöffnete Gasse“

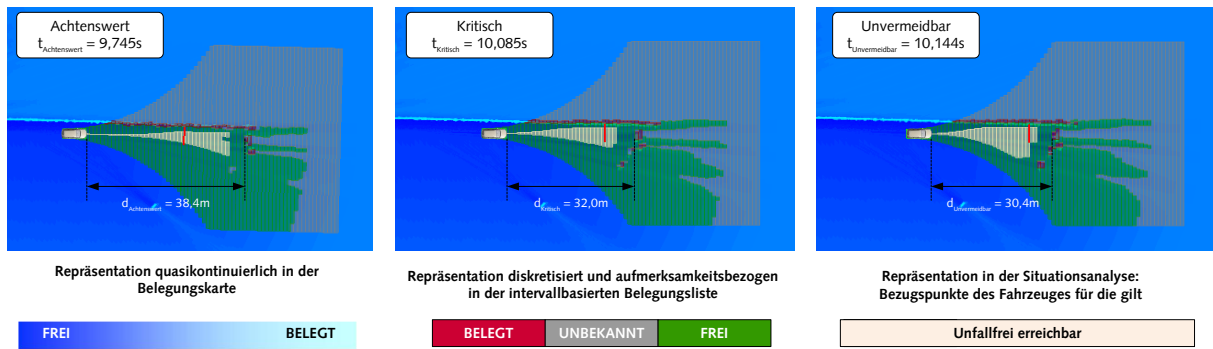


Abbildung 9.4: Szenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“: Draufsicht auf die Datenstrukturen als überlagerte Darstellung. Von unten nach oben: Belegungskarte, intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsdaten der Situationsanalyse, Erreichbarkeitsmenge als interne Repräsentation; von links nach rechts zu den jeweiligen Zeitpunkten der Erkennung der Unausweichlichkeit: Links: Parametrierung *Achtenswert*, Mitte: Parametrierung *Kritisch*, Rechts: Parametrierung *Unvermeidbar*; Roter Balken in allen Bildern: Bremsweg bei Vollverzögerung

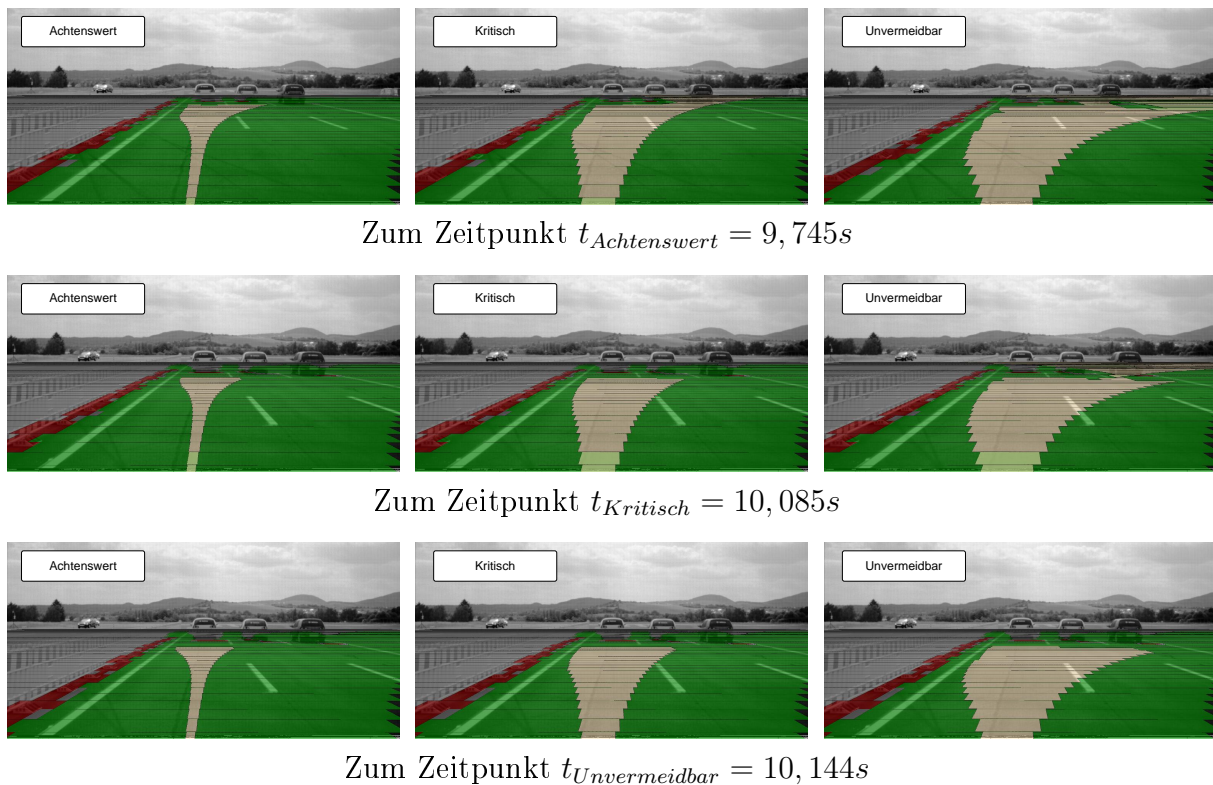


Abbildung 9.5: Szenario Ia - „Stauende mit aufmerksamem Fahrer“: In das Videobild projizierte Eingangsdaten (rot, grün, grau) mit überlagelter interner Repräsentation der Erreichbarkeitsmenge zu verschiedenen Zeitpunkten und Ausprägungen

9.3 Ergebnisse aus den Szenarien II und III - „Geschlossene und geöffnete Gasse“

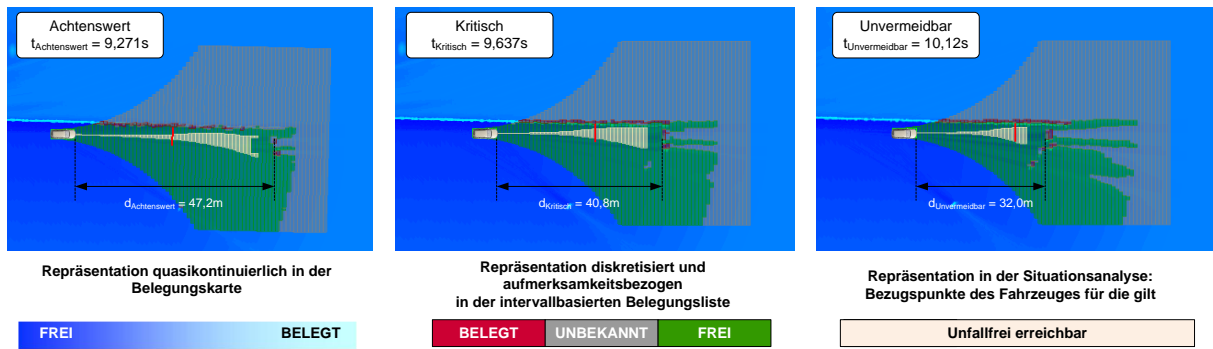


Abbildung 9.6: Szenario Ib - „Stauende mit unaufmerksamem Fahrer“: Draufsicht auf die Datenstrukturen als überlagerte Darstellung. Von unten nach oben: Belegungskarte, intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsdaten der Situationsanalyse, Erreichbarkeitsmenge als interne Repräsentation; von links nach rechts zu den jeweiligen Zeitpunkten der Erkennung der Unausweichlichkeit: Links: Parametrierung *Achtenswert*, Mitte: Parametrierung *Kritisch*, Rechts: Parametrierung *Unvermeidbar*; Roter Balken in allen Bildern: Bremsweg bei Vollverzögerung

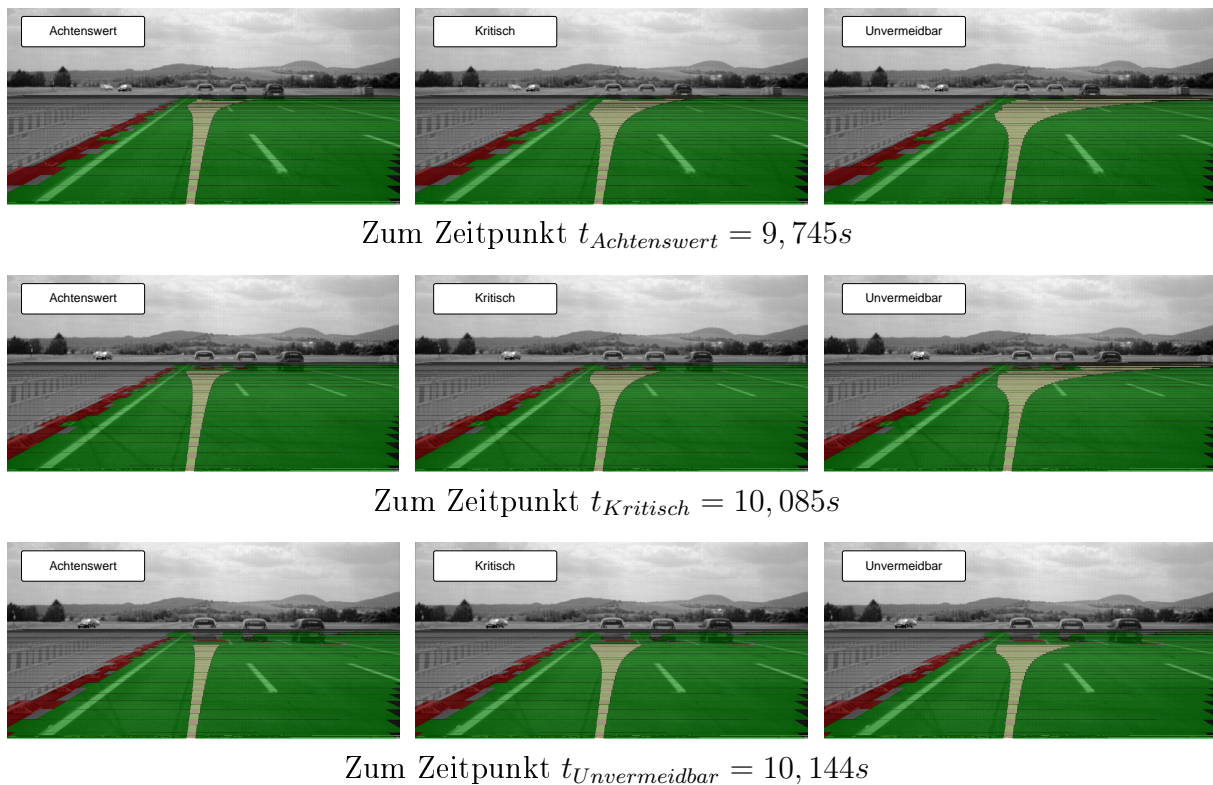


Abbildung 9.7: Szenario Ib - „Stauende mit unaufmerksamem Fahrer“: In das Videobild projizierte Eingangsdaten (rot, grün, grau) mit überlagelter interner Repräsentation der Erreichbarkeitsmenge zu verschiedenen Zeitpunkten und Ausprägungen

dass kein Ausweichen mehr möglich ist.

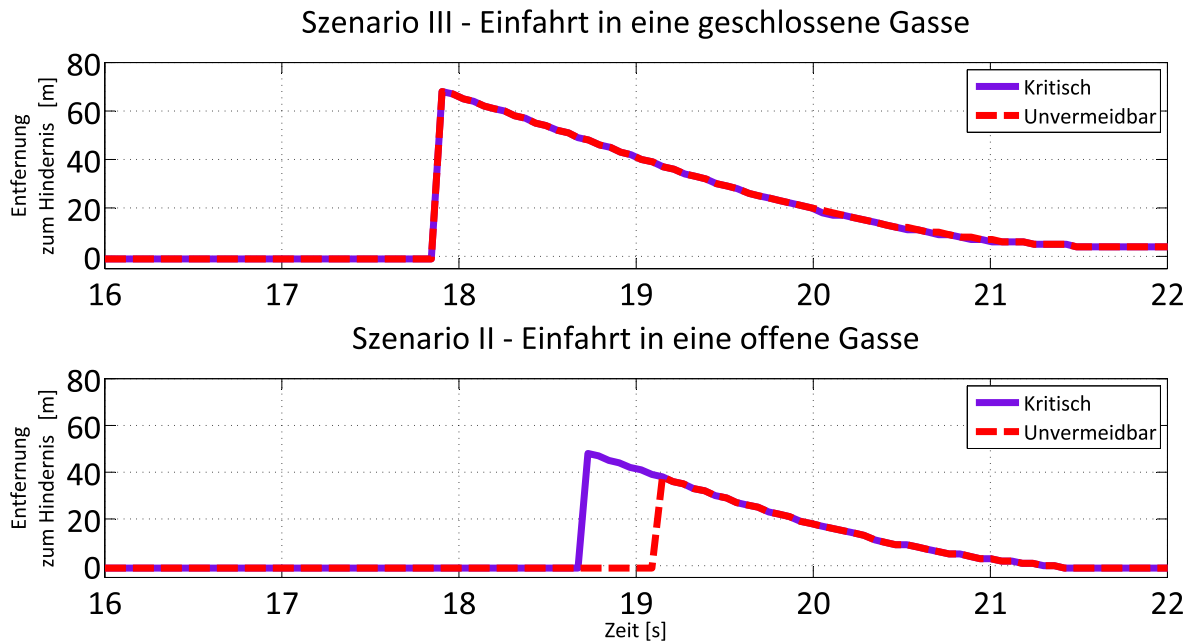
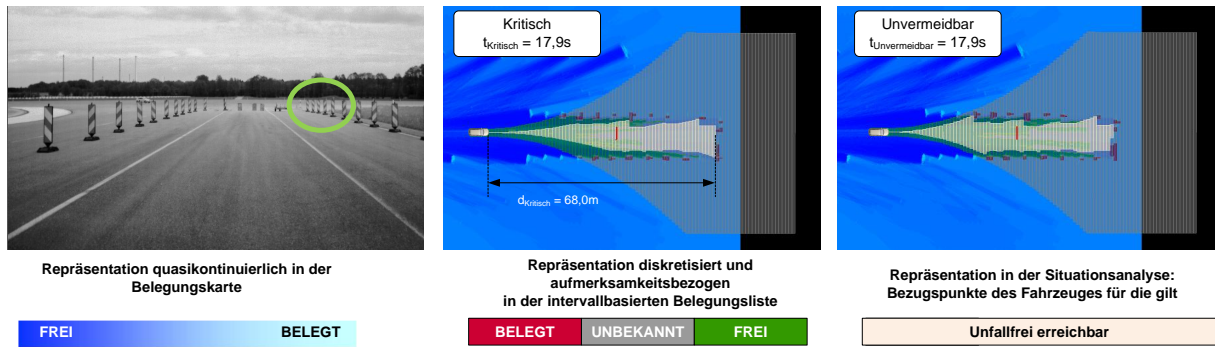


Abbildung 9.8: Detektierte Entfernungen zum Hindernis für die Szenarien II - „Geschlossene Gasse“ und III - „Geöffnete Gasse“

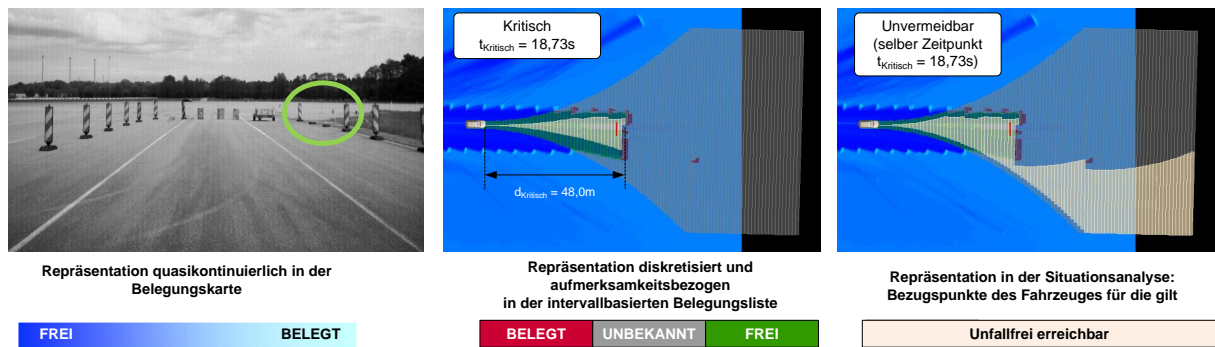
In der Abbildung 9.9 sind die Draufsichten auf die beiden Szenarien dargestellt. Bei der Einfahrt in die geschlossene Gasse kann man erkennen, dass die Vorausschau der Sensorik die Ergebnisse bestimmt, während bei der Einfahrt in die offene Gasse das Schlupfloch rechts sicher detektiert und als Ausweichmöglichkeit beschrieben wird.

9.4 Ergebnisse aus Szenario IV - „Bewegtes Stauende“

Im Beispielszenario IV- „bewegtes Stauende“ soll der Zusatznutzen der komplex-dynamisch-statischen Interaktion des *CoBRA*-Algorithmus herausgearbeitet werden. Hierfür wurde das Szenario zunächst unter Nutzung einer Situationsanalyse eingefahren, die nur einfachstatische Rückwirkungen auf das EGO berücksichtigt und das dynamische Objekt im Nachbarfahrstreifen ignoriert. Aufgrund dessen kam es zu einer Kollision mit dem im Weg stehenden Luftauto. Anhand derselben Daten wird demonstriert, dass die Beachtung des dynamischen Verkehrsteilnehmers zu einer Unfallvermeidung führt. Der in diesem Fall durch die aktive Gefahrenbremsung eingeleitete Verzögerungsverlauf wird simuliert. Um eine Aussage über die Qualität dieser Simulation zu gewinnen, wird auch der Verlauf des zunächst realisierten Szenarios simuliert und mit den Realdaten verglichen.



Szenario II - - „Geschlossene Gasse“ zum Zeitpunkt $t_{Kritisch} = t_{Unvermeidbar} = 17,9s$



Szenario III - „Geöffnete Gasse“ zum Zeitpunkt $t_{Kritisch} = 18,73s$

Abbildung 9.9: Draufsicht auf die Datenstrukturen als überlagerte Darstellung. Von unten nach oben: Belegungskarte, intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsdaten der Situationsanalyse, Erreichbarkeitsmenge als interne Repräsentation; Links: Dokumentationsvideobild, Mitte: Parametrierung *Kritisch*, Rechts: Parametrierung *Unvermeidbar*

In Abbildung 9.10 sind zum einen die Ergebnisse der Analyse ohne Beachtung dynamischer Objekte (*Baseline*) und zum anderen diejenigen unter Beachtung dynamischer Objekte (*Erweitert*) dargestellt. Für die Auswertung wird die Ausprägung *Achtenswert* ausgeblendet, um sich erneut auf die für die Bremsung relevanten Elemente *Kritisch* und *Unvermeidbar* fokussieren zu können. Bei 1, das heißt zum Zeitpunkt $t_{Kritisch}^{Erweitert} = 9,158s$, wird in einer Entfernung von $d_{Kritisch}^{Erweitert} = 18m$ zum Hindernis darauf geschlossen, dass ein Ausweichen in der Parametrierung *Kritisch* nicht mehr möglich ist. Bei 2, also zum Zeitpunkt $t_{Unvermeidbar}^{Erweitert} = 9,518s$ und in einer Entfernung von $d_{Unvermeidbar}^{Erweitert} = 14m$, wird dasselbe unter der Parametrierung *Unvermeidbar* festgestellt. Erst danach, zu den Zeitpunkten $t_{Kritisch}^{Baseline} = 9,758s$ bzw. $t_{Unvermeidbar}^{Baseline} = 10,06s$, detektieren die Analysen ohne Beachtung des Nachbarfahrzeuges die Ausweglosigkeit. Dies reicht nicht für eine kollisionsvermeidende Bremsung, sodass das Versuchsfahrzeug zum Zeitpunkt $t_{Unfall} = 11,13s$ mit dem Hindernis kollidiert (Marker 5). Im oberen Teil der Grafik ist der Verlauf der Beschleunigungen, in der Mitte der Verlauf der Geschwindigkeiten dargestellt. Im Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Daten für die Baseline ist erkennbar, dass die genutzte Simulation für eine Abschätzung des Geschwindigkeitsverlaufes hinreichend genau ist. Daher kann diese Simulation auch für die Analyse des Verlaufes bei dynamischer Erweiterung herangezogen werden. Aus dieser ist ersichtlich, dass das Fahrzeug nach einer kaskadierten Verzögerung kollisionsfrei ca. 3 Meter vor dem Hindernis zum Stehen kommt (Marker 6).

In den Abbildungen 9.11 und 9.12 werden die Eingangsdaten sowie die intern generierten sicheren Aufenthaltsgebiete und Erreichbarkeitsmengen zum Zeitpunkt $t_{Kritisch}^{Erweitert} = 9,158s$ bzw. $t_{Unvermeidbar}^{Erweitert} = 9,518s$ visualisiert. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse einer Auswertung ohne komplex-dynamische Interaktion gegeben. In den dreidimensionalen Grafiken dient die dritte Dimension zur Darstellung der Zeit. Hierbei wird deutlich, wie sich das sichere Aufenthaltsgebiet über die Zeit verschiebt. Des Weiteren entstehen in dieser Darstellung aus statisch belegten Flächen Hindernissäulen, da diese Bereiche zu keinem Zeitpunkt frei sind.

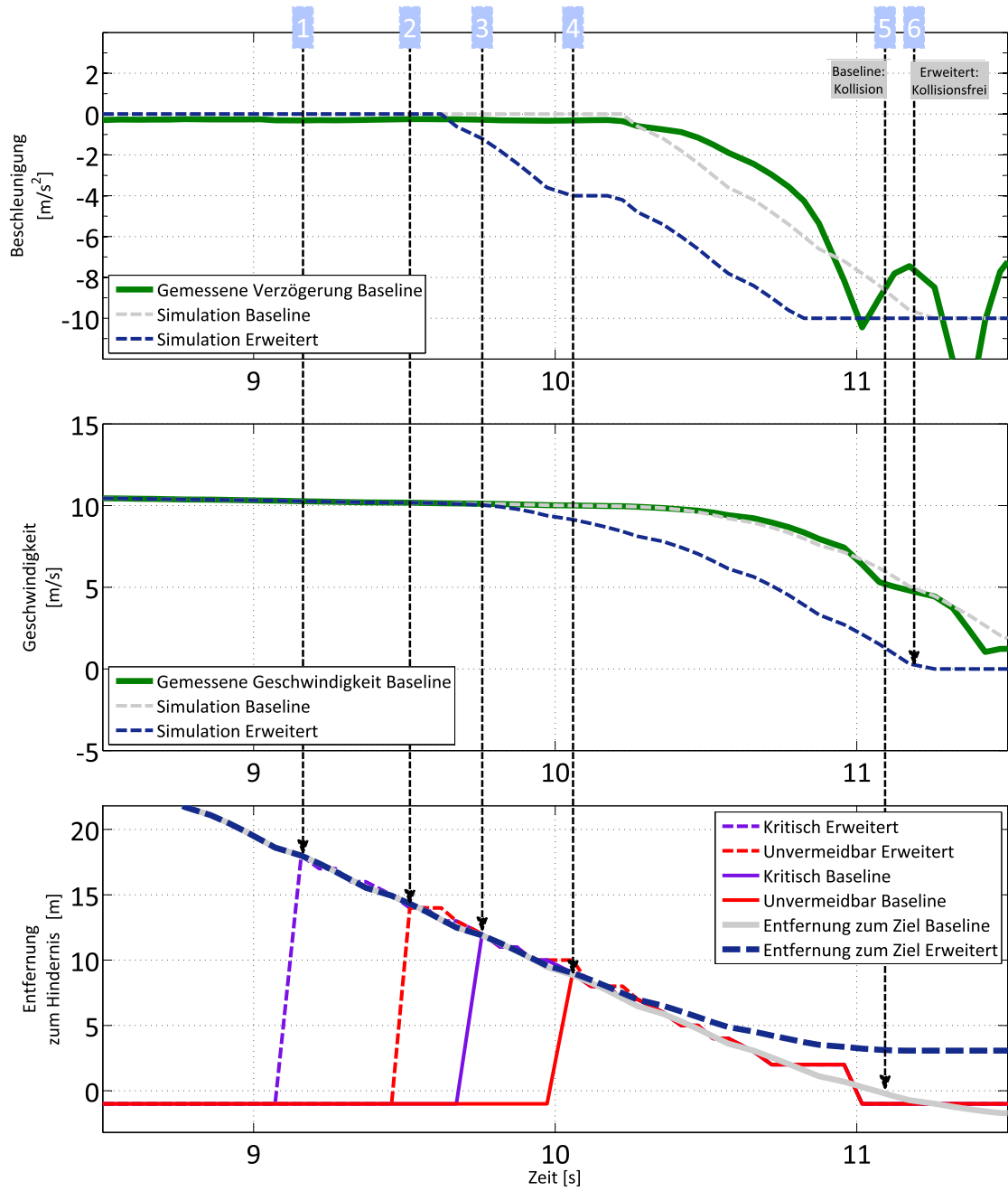


Abbildung 9.10: Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und detektierte Entfernungen zum Hindernis für das Szenario IV - „bewegtes Stauende“, Die Marker x werden im Text für Erläuterungen aufgegriffen.

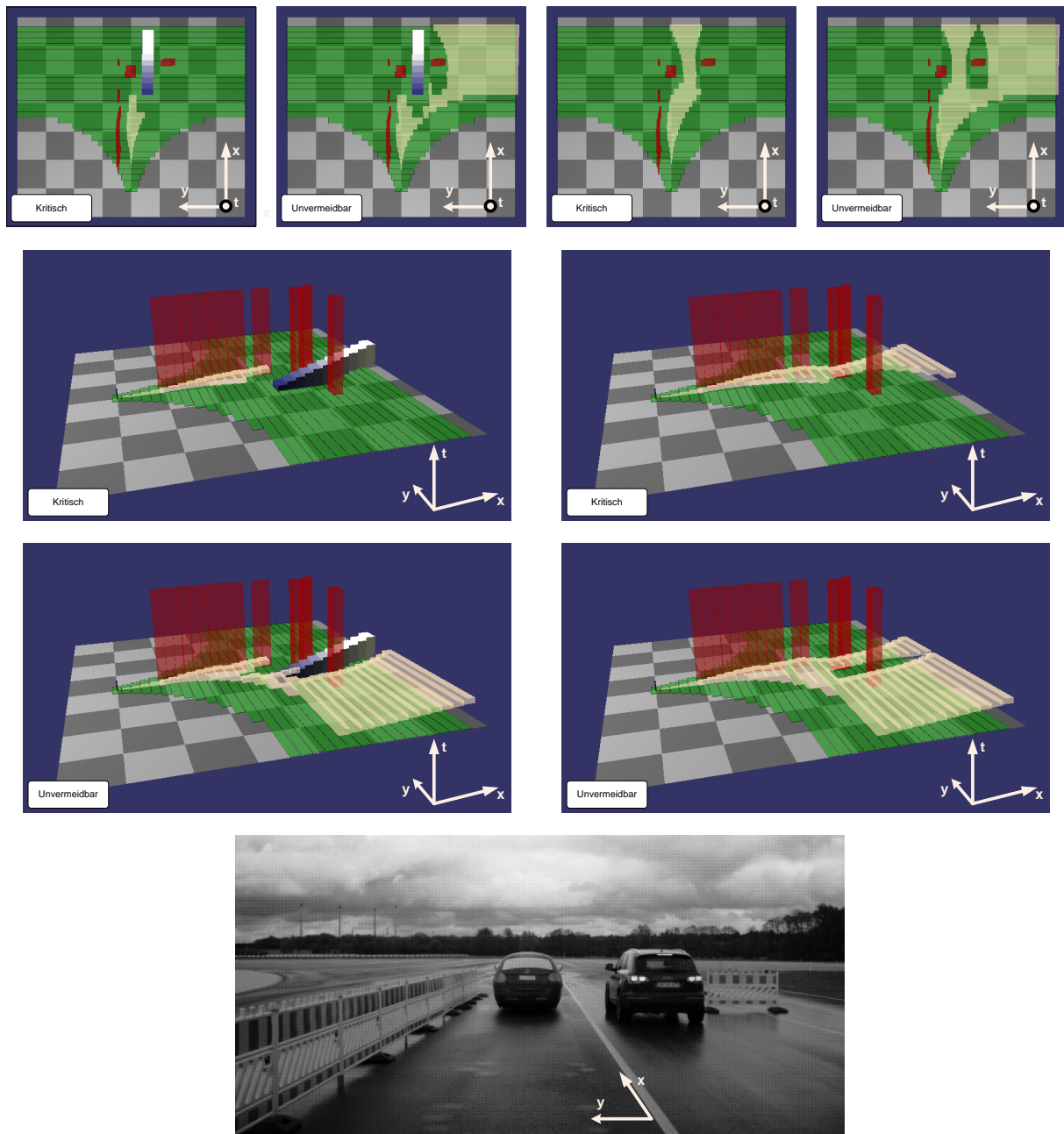


Abbildung 9.11: Intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsdaten (rot, grün, grau) sowie die Erreichbarkeitsmenge (grau) bzw. sichere Aufenthaltsgebiete (blau bis weiß) als interne Repräsentationen der Situationsanalyse. Alle Bilder zum **Zeitpunkt** $t_{\text{Kritisch}}^{\text{Erweitert}} = 9,158s$ (siehe Marker [1](#) in Abb. 9.10). Jeweils links in der erweiterten Variante mit Beachtung des dynamischen Nachbarfahrzeuges, jeweils rechts ohne dessen Beachtung. In den 3D-Abbildungen dient die dritte Dimension der Darstellung der Zeit. Das blau in weiß übergehende Volumen beschreibt das sichere Aufenthaltsgebiet des Fremdfahrzeuges. Die roten Säulen entstehen über statisch belegten Flächen, da diese zu jedem Zeitpunkt belegt sind.

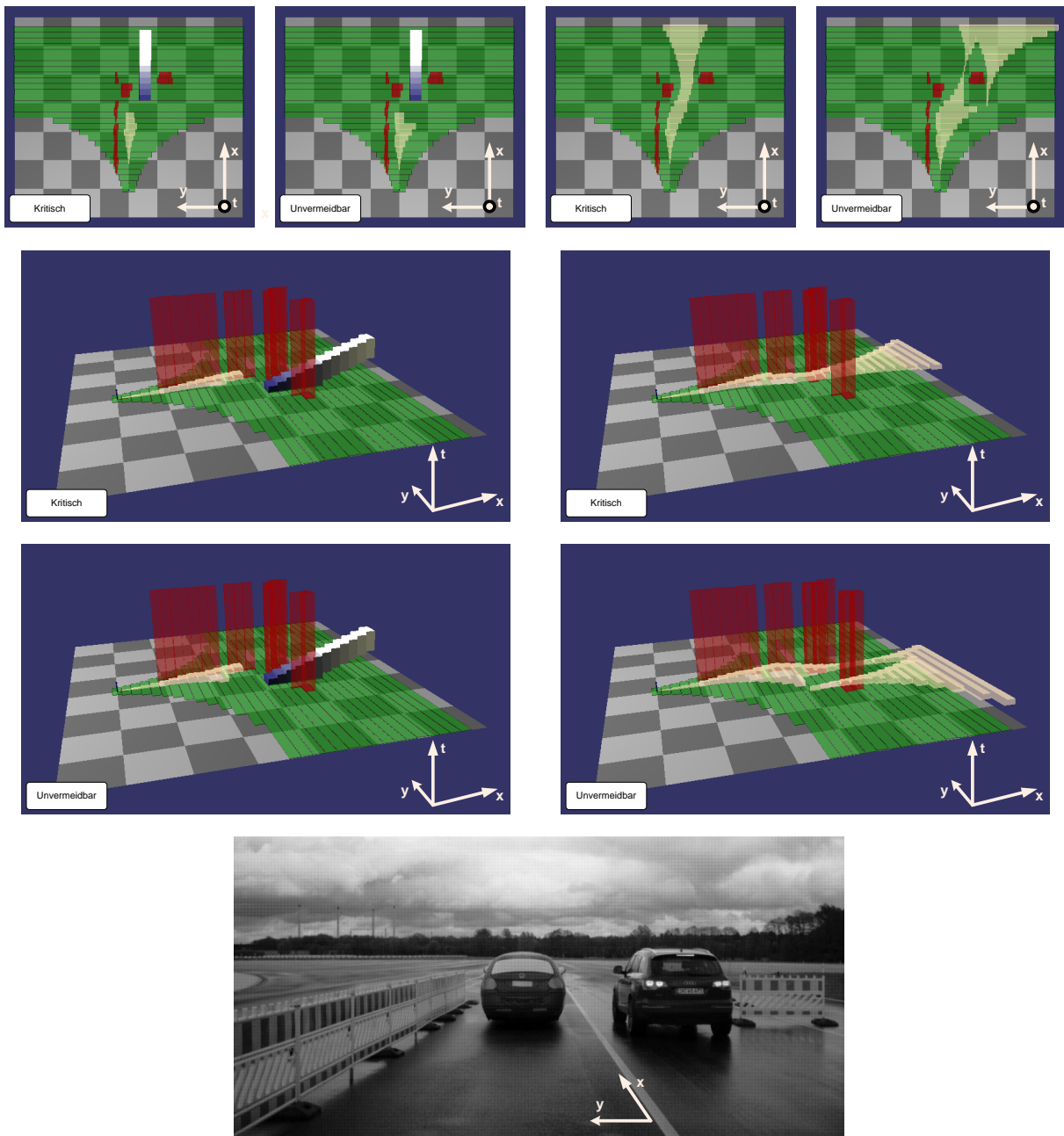


Abbildung 9.12: Intervallbasierte Belegungsliste als Eingangsdaten (rot, grün, grau) sowie die Erreichbarkeitsmenge (grau) bzw. sichere Aufenthaltsgebiete (blau bis weiß) als interne Repräsentationen der Situationsanalyse. Alle Bilder zum **Zeitpunkt** $t_{Unvermeidbar}^{Erweitert} = 9,518s$ (siehe Marker [2](#) in Abb. 9.10). Jeweils links in der erweiterten Variante mit Beachtung des dynamischen Nachbarfahrzeuges, jeweils rechts ohne dessen Beachtung. In den 3D Abbildungen dient die dritte Dimension der Darstellung der Zeit. Das blau in weiß übergehende Volumen beschreibt das sichere Aufenthaltsgebiet des Fremdfahrzeuges. Die roten Säulen entstehen über statisch belegten Flächen, da diese zu jedem Zeitpunkt belegt sind.

10 Diskussion der Ergebnisse

Der hier vorgestellte Ansatz zur Situationsanalyse mit Hilfe des *CoBRA*-Algorithmus hat den Anspruch, in beliebig strukturierten Umgebungen ein aktives Eingreifen durch das Fahrzeug zu rechtfertigen. Dabei sollen andere Verkehrsteilnehmer genauso berücksichtigt werden wie die statische Umgebung und mögliche Interaktionen zwischen ihnen. Dem sicheren Erkennen von Eingriffsszenarien muss genauso viel Beachtung geschenkt werden wie dem sicheren Erkennen von Nicht-Eingriffsszenarien. Zudem soll die erarbeitete Methodik eine einfache Anpassung an die Fahreraufmerksamkeit ermöglichen.

Mit den Ergebnissen aus den Szenarien I bis IV konnte gezeigt werden, dass der *CoBRA*-Algorithmus die gestellten Anforderungen erfüllt. Im ersten Szenario wurde der Mehrwert im Vergleich zu den Ansätzen gezeigt, die nur ein Objekt als relevant einstufen und die Kritikalitätsberechnungen auf dieses einschränken. Erst mit der Erkennung und Berücksichtigung der Randbebauung und weiterer statischer Hindernisse ist eine kollisionsvermeidende Bremsung möglich, ohne in vielen anderen Situation fehlerhaft auszulösen. Bei diesem Szenario ist zudem ersichtlich, dass die Berücksichtigung der Fahreraufmerksamkeit problemlos und nachvollziehbar integriert ist. Bei detektierter Unaufmerksamkeit geht der Algorithmus davon aus, dass die momentane Querbeschleunigung sich anfangs nur innerhalb enger Grenzen ändert.

Mit den Ergebnissen aus den Szenarien II und III - „Geschlossene und geöffnete Gasse“ im Vergleich wird deutlich, dass die Analyse beliebige Ausweichwege finden kann und somit zur Reduzierung von Fehlauflösungen beiträgt. Dieser Anwendungsfall stellt zudem die Leistungsfähigkeit der Methodik heraus. Mit anderen Verfahren - wie zum Beispiel dem Einzeltrajektorienverfahren - wäre es nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich, die Lücke sicher zu erkennen.

Mit dem Szenario IV - „Bewegtes Stauende“ werden die Vorteile und die Anwendbarkeit einer komplexen Analyse mit dynamischen Objekten und unter Beachtung von Interaktionsbeziehungen ausgewiesen. Zum einen passt sich das dynamische Objekt der statischen Umgebung an und kann selbst nur durch die sich ergebende Lücke fahren. Zum Zweiten wird der mögliche Ausweichweg gerade durch dieses Fahrzeug begrenzt. Erst mit einer solch komplexen Analyse ist es möglich, in diesem Szenario kollisionsvermeidend zu bremsen.

Die Vorteile, eine beliebige Struktur von Hindernissen berücksichtigen zu können sowie einen Ausweichweg zu suchen, haben allerdings auch einen Nachteil: Aus den Visualisie-

rungen wird ersichtlich, dass im Falle der fehlenden Akkumulation von Hinderniskanten vermeintliche Ausweichwege gefunden werden, die in der Realität nicht existieren. Da der Algorithmus die Daten der Belegungskarte nicht kontextspezifisch hinterfragt (Ist das eine Fahrzeugkante und versperrt dieses Fahrzeug meinen Fahrstreifen?), wird er dies in seiner vorgestellten Form auch nicht leisten können. Des Weiteren werden in dieser Variante auch Lücken als Ausweichwege gefunden, die höchst wahrscheinlich nicht gefahren werden. Bei einem Stau auf der Autobahn wird beispielsweise niemand mit hoher Geschwindigkeit den Standstreifen nutzen wollen. Grundsätzlich kann eine vorgelagerte Analyse diese Mängel beseitigen und einzelne Wege durch Belegtinformationen versperren - diese Erweiterung kann an dieser Stelle allerdings noch nicht validiert werden.

11 Ausblick: Erweiterung um die Funktion einer Ausweichassistentz

Im Folgenden soll exemplarisch gezeigt werden, dass sich die Berechnungsergebnisse zur Erreichbarkeitsmenge nicht nur zur Evaluation der Unausweichlichkeit einer Situation eignen, sondern auch als Grundlage einer Ausweichassistentz in kritischen Situationen herangezogen werden können. Als Beispiel wird das bereits beschriebene Szenario III - „Geöffnete Gasse“ genutzt, in dem eine Lücke in der Bakenreihe auf der rechten Seite eine Ausweichbahn ermöglicht.

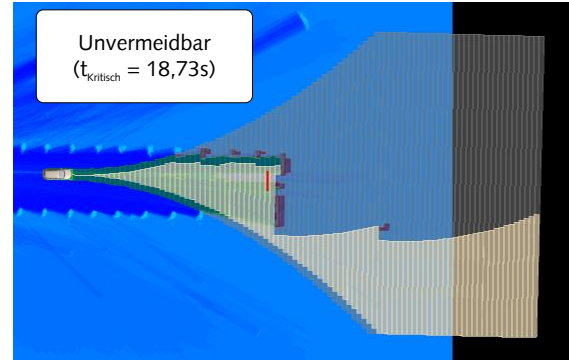
Im ersten Schritt muss die Notwendigkeit einer Assistentz festgestellt werden. Dies kann allein schon aus dem Wegfall der Möglichkeit eines Ausweichens für einen Normalfahrer (Parametrierung *Kritisch*) geschlossen werden. Es bleibt somit nur noch ein sportliches Ausweichmanöver. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung der Daten über potentielle Ausweichbahnen, wobei für detaillierte Ausführungen an dieser Stelle auf die im Rahmen dieser Dissertation betreute Arbeit von Rosenkranz (2010) verwiesen wird.

Eine Unterstützung des Fahrers - sei es in der Ausprägung eines optischen Hinweises oder einer assistierenden Lenkmomentaufschaltung - bedarf im zweiten Schritt der Berechnung einer möglichst optimalen Ausweichbahn im Hinblick auf den Krümmungsverlauf und damit auf die Querbeschleunigung und die Stellreserve. Für die autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring entwickelte Wille (2012) im Rahmen seiner Dissertation eine manöverunabhängige Bahnplanung, die eine Bahn unter derartigen Randbedingungen ermittelt. Als Eingangsdatum benötigt der Algorithmus ein befahrbares Band, das leicht aus der Erreichbarkeitsmenge extrahiert werden kann.

Im oberen Teil der Abbildung 11.1 wird zunächst das Szenario aufgegriffen (siehe auch Abb. 9.9). Zum Zeitpunkt $t_{Kritisch} = 18,73s$ ist ein Ausweichen in der Parametrierung *Kritisch* nicht mehr möglich - wohl aber eines unter Nutzung aller Dynamikmöglichkeiten des EGO. Die unter der Parametrierung *Unvermeidbar* generierte Erreichbarkeitsmenge dient als Grundlage der Berechnung der Grenzen des erlaubten Fahrbereichs. Hiermit berechnet die manöverunabhängige Bahnplanung die im unteren Teil gezeigte Bahn. Diese kann durch eine Ausweichassistentz als Sollgröße für einen aktiven Stelleingriff oder eine entsprechende optische Unterstützung verwendet werden.



Repräsentation diskretisiert und aufmerksamkeitsbezogen in der intervallbasierten Belegungsliste



Repräsentation in der Situationsanalyse: Bezugspunkte des Fahrzeuges für die gilt



Ausgangsbasis: Szenario III zum Zeitpunkt $t_{kritisch} = 18,73s$, zu dem nur noch ein äußerst sportliches Ausweichen möglich ist

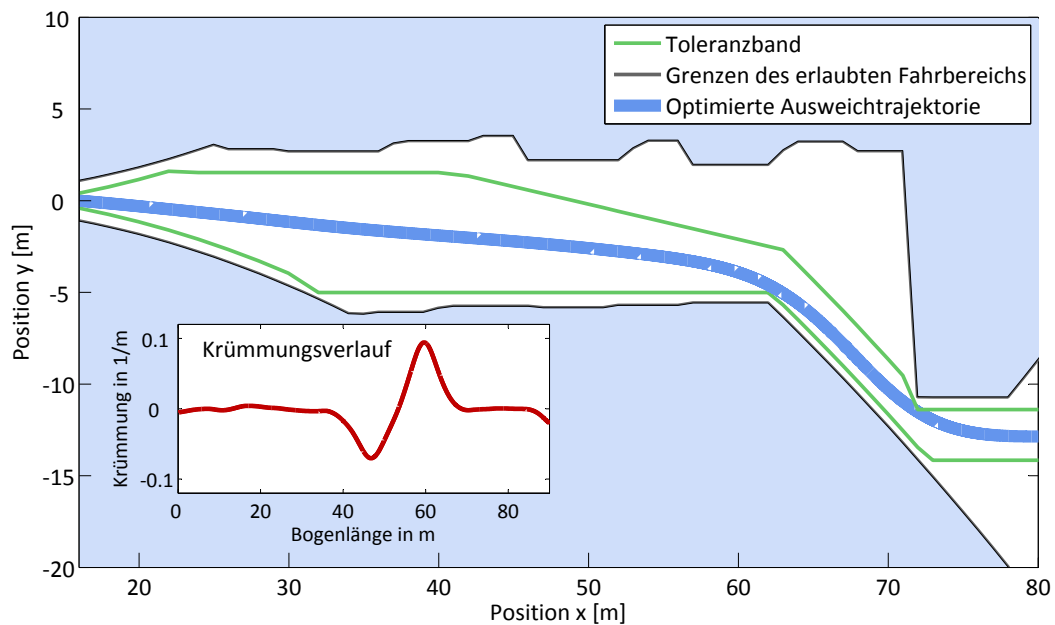


Abbildung 11.1: Generierte Ausweichbahn zur Ausweichunterstützung auf der Grundlage der ermittelten Erreichbarkeitsmenge (Vgl. auch Wille (2012) für die Berechnung der optimierten Ausweichtrajektorie)

Teil IV

Situationsanalyse für eine Komfortfunktion

12 Erkennung einer Einfädelsituation als Teil der Situationsanalyse

Mit zunehmendem Unterstützungsgrad von Fahrerassistenzsystemen im Alltag wachsen die Anforderungen hin zu einem multivarianten, situativ angepassten Verhalten dieser Systeme. Grundlage hierfür bilden Detektionsmechanismen für definierte Situationen. Die Einfädelsituation (EFS) ist eine solche Situation, bei der nicht nur der Gesetzgeber ein bestimmtes Kooperationsverhalten vorgibt, sondern in der alle Beteiligten ein stärkeres Miteinander erwarten. In diesem Kapitel wird zunächst die Notwendigkeit der Entwicklung einer EFS-Erkennung dargelegt. Im Anschluss werden das Fahrzeug und die genutzte Wahrnehmungsalgorithmik sowie die gewählte Klassifikationsmethodik besprochen. Eine ausführliche Beschreibung zum strukturierten Design des gesuchten Klassifikators bildet den Kern dieses Kapitels und schließt es gleichzeitig ab.¹²²

12.1 Motivation und Nutzen

Die aus derzeitig erhältlichen Serienfahrzeugen bekannten Komfortsysteme für den Längsverkehr beschränken sich im Wesentlichen auf die einfache Folgeregelung. Weiterentwicklungen führten bislang zu graduellen Steigerungen des Kundennutzens: Zunächst wurde der komplette Geschwindigkeitsbereich abgedeckt¹²³, parallel wurde an der Zieldetektion und -verfolgung in schwierigen Szenarien wie zum Beispiel in Kurvenfahrten gearbeitet. Erste Premiumhersteller unterstützen in einem engen Zeitrahmen das automatische Wiederanfahren aus dem Stillstand. Ein wesentlicher Komfortsprung für den Fahrer ist mit der Einführung von vollautomatischen Systemen zu erwarten. Das kann zum Beispiel ein Fahrzeug sein, dass im Stau die Längs- als auch die Querführung für einen längeren Zeitraum vollständig übernimmt. Gerade in einem solchen Szenario müssen auch vom Normalzustand „Fahren im Stau“ abweichende Situationen sicher erkannt werden. Eine dieser Sondersituationen stellt die Einfädelsituation (EFS) dar, wie sie in Abbildung 12.1 gezeigt wird. Der Gesetzgeber bestimmt für solche Situationen das Reißverschlussverfahren

¹²²Für ausführlichere Darstellungen zur EFS-Erkennung vgl. Reichel u. a. (2010a) sowie die von mir betreute Arbeit von Rauschecker (2010)

¹²³Vgl. auch ISO 15622:2002 (Adaptive Cruise Control), ISO 22179:2009 (Full Speed Range ACC)

als Lösungsmethode.¹²⁴ Ein fortschrittliches stau-assistierendes System muss somit sein Kooperationsverhalten in einer EFS ändern. Dies ist nicht nur eine gesetzgeberische Vorschrift, sondern auch ein Muss zum Schutz des eigenen Fahrzeuges: Die beteiligten Fahrer ändern ihre Erwartungshaltung und ihre Verhaltensweise ungeachtet der Tatsache, dass das Nachbarfahrzeug eventuell automatisch und nicht manuell unterwegs ist.



Abbildung 12.1: Ansichten einer realen Einfädelsituation

Die Forschung zur Erkennung von EFS gewinnt zudem dadurch an Gewicht, dass mit den angekündigten Maßnahmen zur Sanierung und Ausweitung des Straßennetzes auch die Anzahl an Staus mit Fahrstreifeneinzug wachsen wird.¹²⁵ Schon heute entstehen laut der Antwort der deutschen Bundesregierung auf eine Anfrage von Bundestagsabgeordneten circa 66% aller Staus in Deutschland durch eine Bau- oder Unfallstelle, wobei ein Großteil davon einen Fahrstreifeneinzug beinhaltet (Vgl. Bundesdrucksache (2009).

Neben der serienorientierten Vorentwicklung wächst auch die Forschungsgemeinde zum Thema *Autonomes Fahren*. Motiviert durch Erfolge bei den Grand Challenges¹²⁶ beschäftigt sie sich mit dem Aufbau autonomer Fahrzeugsysteme, die in komplexen Umgebungen adäquat agieren. Das Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig konnte in diesem Zusammenhang vor kurzem erfolgreich die erste autonome Fahrt in innerstädtischer Umgebung präsentieren.¹²⁷ Im Zuge dessen gaben auch andere Forschungsgruppen bekannt, ebenfalls an ähnlichen Systemen zu arbeiten.¹²⁸

¹²⁴§7 Absatz 4 StVO, abgedruckt in dieser Dissertation auf Seite 146

¹²⁵Vgl. MDR Redaktion (2011)

¹²⁶Vgl. auch Kapitel 2.3.1 Seite 29ff

¹²⁷Vgl. auch Kapitel 2.2.1, Seite 24ff sowie Wille (2012); Wille u. a. (2010a,c, 2009a)

¹²⁸Vgl. Thrun (2010); Schaub u. a. (2011); Windeck (2010); Sengbusch (2010)

Sowohl vollautomatische als auch assistierende Systeme können durch situationsspezifisches und damit adäquates Agieren im komplexen Verkehr punkten. Fahrzeuge auf dem Fahrstreifen der weiterfährt und in den andere einscheren, können gezielt Platz für potentielle Einscherer zu lassen. Diese wiederum sind in der Lage, stärker auf die Kooperationsbereitschaft des anderen zu setzen. In beiden Fällen ist eine möglichst niedrige Falschklassifikation der EFS notwendig. Das mündet zwar auch in einer höheren Fehlklassifikation, ist aber für die Assistenzsysteme vorteilhafter: Im ersteren Fall kommt es zu weniger unplausiblen Verhalten in fälschlich erkannten EFS und im zweiten Fall setzt sich das Fahrzeug nur dann einem erhöhten Risiko aus, wenn mit Kooperation seitens des Anderen in höherem Maße gerechnet werden kann.

Das Beherrschen der Einfädelsituation stellt somit einen wichtigen Baustein für den Einsatz im realen Verkehr dar, denn ein kooperatives Verhalten in einer Reißverschlussituation erhöht die Sicherheit und die Akzeptanz solcher Systeme. Als Konsequenz wird im Folgenden ein System zur Erkennung von EFS vorgestellt.

12.2 Systemübersicht

Für die Aufzeichnung von Daten aus dem Realverkehr wurde ein AUDI A6 als Versuchsträger genutzt, der im Vergleich zur Serienausstattung mit weiteren Sensoren, zusätzlichen CAN-Bussen und der Möglichkeit der Datenverarbeitung und -aufzeichnung erweitert wurde. Das im Fahrzeug verbaute LRR3-Doppelradarsystem, das serienmäßige ESC-Cluster und ein zusätzlich verbauter Vorentwicklungs-Lasersensor bilden das verwendete Sensorset. Obgleich das Fahrzeug als Sensorträger in der Entwicklungsabteilung „Fahrerassistenzsysteme“ bei der AUDI AG eingesetzt wird und dementsprechend über eine Vielzahl weiterer Sensoren verfügt, wurden diese bewusst für die Erkennung einer Einfädelsituation ausgeklammert. Die in diesem Kapitel gezeigten Videobilder stammen aus einer Frontkamera und dienen lediglich der Dokumentation.

Innerhalb der primären Wahrnehmung wird auf das bereits in Kapitel 5 auf den Seiten 58ff vorgestellte Masterkonzept mit Ego- sowie Kartenmaster zurückgegriffen.¹²⁹ Neben der 2D Belegungskarte ist zusätzlich eine intervallbasierte Merkmalskarte implementiert, in der Informationen über dynamische Objekte akkumuliert werden. Eine solche Repräsentation der dynamischen Umwelt ermöglicht die Schlussfolgerung auf den Verlauf von Kolonnenspuren, also auf den Verlauf von Trajektorien von Fahrzeugen, die hintereinander in einer Kette fahren. Die Grundlagen der hierfür notwendigen kartenbasierten Methoden wurden von Bouzouraa im Rahmen seiner Dissertation erarbeitet.¹³⁰ Die Zusammenführung der Einzelmerkmale zu Kolonnenspuren und deren weitere Verwendung bilden Teile meiner Dissertation. Insgesamt handelt es sich um ein vielversprechendes und neuartiges Signal-

¹²⁹Vgl. Bouzouraa (2012); Bouzouraa u. a. (2010); Bouzouraa und Hofmann (2010, 2009)

¹³⁰Vgl. Kapitel 2D *Kartenbasierte Umfeldwahrnehmung* der Dissertation Bouzouraa (2012)

verarbeitungsverfahren, das für die Erkennung einer Einfädelsituation große Bedeutung besitzt. In den Abbildungen 12.2 bis 12.4 sind die Eingangsdaten für die Situationsanalyse zur Erkennung einer Einfädelsituation dargestellt.

12.3 Methodenwahl

Bei dem Problem des Erkennens einer Einfädelsituation handelt es sich um die Aufgabe der Klassifikation, also der Generierung einer Klassenzuordnung aus einem Merkmalsraum:

$$y[n] = f(\mathbf{S}[n]) \in \{!EFS, ?EFS, EFS\}, \quad (12.1)$$

wobei $y[n] = EFS$ das Vorliegen einer Einfädelsituation zum Zeitschritt n bejaht und $y[n] = !EFS$ dies verneint. Die Klasse $y[n] = ?EFS$ beschreibt einen unbestimmten Übergangszustand.¹³¹ Die Grundlage bilden Merkmalsdaten aus einem sogenannten *Scenario-Slice* S . Zur Lösung des Klassifikationsproblems existieren zahlreiche Methoden, wie zum Beispiel NVS (Naive Bayes Classifier), SVM (Support Vector Machine), Neuronale Netzwerke, Fuzzy-Logik, Logistische Regression und weitere. An dieser Stelle wird auf das sogenannte Scenario Based Random Forest (SBRF) Verfahren zurückgegriffen, das von Botsch (2009) im Rahmen seiner Dissertation entwickelt wurde. Von ihm stammt auch ein Framework, dessen algorithmischer Kern für den Lernprozess, die Merkmalsselektion sowie die Klassifikation selbst der in meiner Dissertation vorgestellten Situationserkennung genutzt wird. Das Verfahren selbst wurde bislang bei der der Situationsklassifikation für FAS noch nicht eingesetzt und somit dient die folgende Arbeit auch zur Beurteilung des Verfahrens hinsichtlich der weiteren Nutzung im FAS-Biotop. Des weiteren sprechen folgende Punkte für [+] bzw. gegen [-] seinen Einsatz:

- + Der SBRF gehört zur Gruppe der Ensemble-Verfahren und zeigt daher sowohl gute Verallgemeinerungseigenschaften als auch eine gute Abbildung der Trainingsdaten.
- Der SBRF kann die Unsicherheiten der Merkmale oder zugrundeliegender Merkmalsvorverarbeitungen nicht explizit abbilden,
- + dafür müssen allerdings auch keine schwer greifbaren Übergangswahrscheinlichkeiten gesucht werden.
- + Die Einzelvotierungen aus den Klassifizierungen jedes einzelnen Baumes des Waldes (SBR - Forest), also die Stimmverhältnisse des Waldes, können zur Bestimmung der Güte der Klassifikation genutzt werden.

¹³¹Siehe hierfür Kapitel 15.1

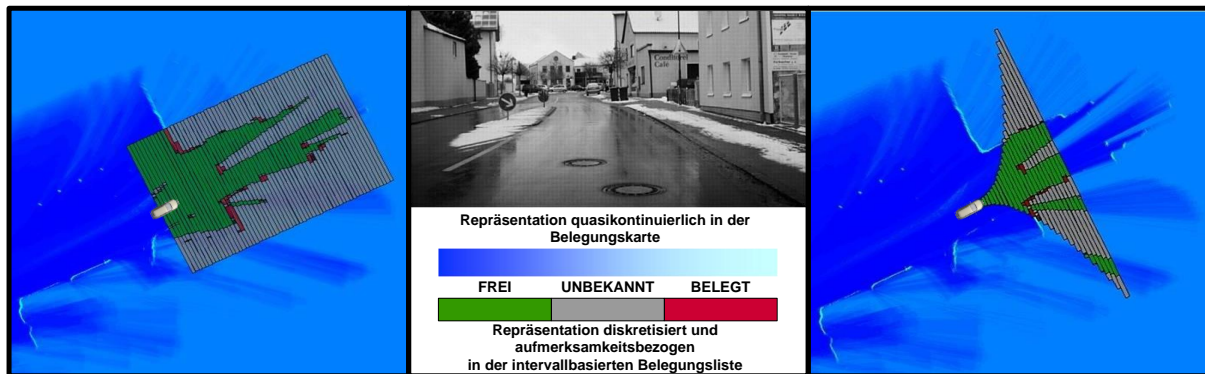


Abbildung 12.2: Belegungskartenbasierte Eingangsinformation, Mitte: Kamerabild der realen Szene, Links und Rechts: Belegungskarte als Hintergrund mit überlagerter intervallbasierter Ausgangsschnittstelle

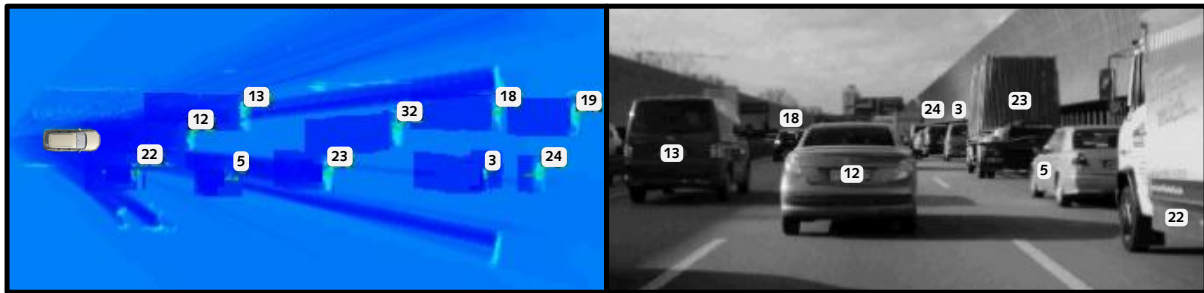


Abbildung 12.3: Eingangsinformationen über dynamische Verkehrsteilnehmer auf Basis eines Radarsensors, Links: In die Ebene projizierte Informationen mit der Belegungskarte als Hintergrund, Rechts: Kamerabild der realen Szene

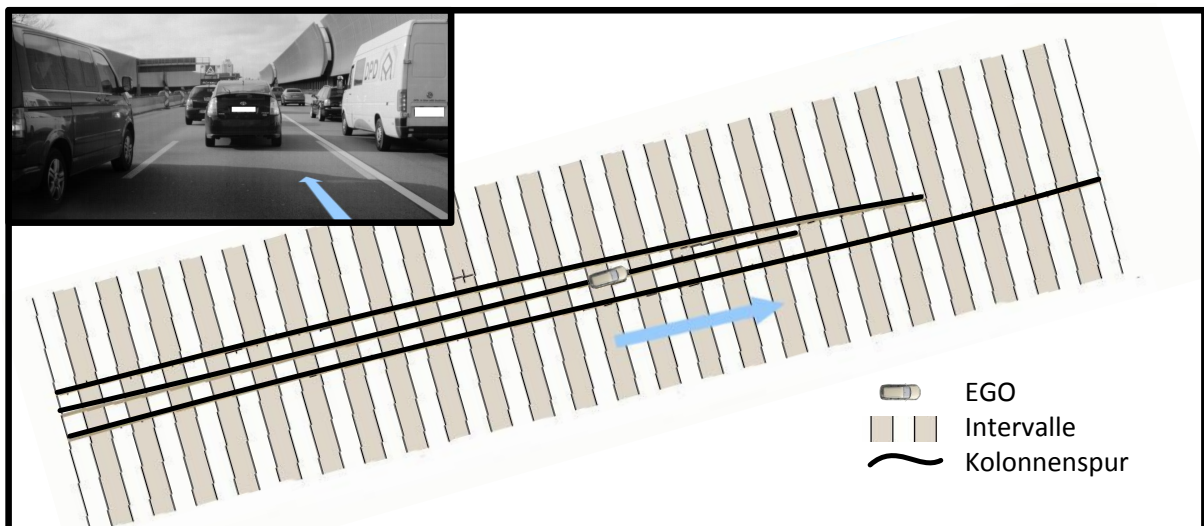


Abbildung 12.4: Eingangsinformationen über Kolonnenspuren auf Basis einer intervallbasierten Karte zur Akkumulation des Wissens über dynamische Objekte

- + Mit Hilfe der Stimmverhältnisse kann zudem vermieden werden, dass der Klassifikator in die „Falle tappt“, sich für eine Klasse entscheiden zu müssen. Vielmehr kann er eine Klassifikation auch verweigern.
- + Der SBRF besitzt die Möglichkeit der out-of-bag estimation (oob), wobei alle Daten sowohl zum Training als auch zum Testen verwendet werden können.
- + Der SBRF bietet die Möglichkeit der Merkmalsselektion an. Dies ist für den Anwender ein unschätzbares Instrument zur Beurteilung der Güte bestimmter Merkmale. Um dem *Fluch der Dimensionalität*¹³² entgegenzuwirken, kann so gezielt auf unwichtige Merkmale verzichtet werden.
- + Die Merkmalsselektion dient auch dem Verständnis des Klassifikationsvorganges - der Experte kann hiermit das von ihm zu Grunde gelegte Modell validieren.
- + Über eine Kostenfunktion kann der Klassifikator auf ADAS spezifische Gegebenheiten Rücksicht nehmen. So erscheint es für einige Anwendungen sinnvoll, ein häufiges Springen zwischen Zuständen in einer Übergangsphase zu bestrafen.
- + Aus intrinsischen Daten des SBRF können die Parameter des Generalisierte Radiale Basisfunktionen (GRBF) - Klassifikators berechnet werden. Dieser zeichnet sich vor allem durch die gute Interpretierbarkeit aus, was aus rechtlichen Gesichtspunkten ein großer Vorteil, wenn nicht gar eine notwendige Voraussetzung für den Einsatz in sicherheitsrelevanten ADAS Funktionen ist.¹³³

Da der SBRF noch keine große Verbreitung bei der Klassifikation im Forschungsumfeld der FAS besitzt, stellt sich die wissenschaftlich reizvolle Frage nach der Anwendbarkeit dieses Verfahrens in der Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme. Im Vorgriff auf die Ergebnisdarstellungen in Kapitel 15 kann an dieser Stelle vorweggenommen werden, dass sich der Einsatz des SBRF vorteilhaft auf das Klassifikatordesign und -ergebnis auswirkt.

¹³²Fluch der Dimensionalität - Ein Begriff, der von Bellman (1972) eingeführt wurde. Er beschreibt das Faktum, dass das Volumen des Merkmalraumes mit Hinzufügen neuer Dimensionen rapide ansteigt. Beispiel: 100 Beobachtungen decken den eindimensionalen Raum der reellen Zahlen zwischen 0 und 1 ziemlich gut ab. Aus diesen Beobachtungen lassen sich zum Beispiel mittels eines Histogramms Schlussfolgerungen ziehen. Wenn man in einem 10-dimensionalen Raum der gleichen Art (jede Dimension kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen) 100 Stichproben sammelt, sind dies isolierte Punkte, die den Raum bei weitem nicht abdecken. Um eine ähnliche Beschreibungsdichte wie im eindimensionalen Raum zu erreichen, müsste man $100^{10} = 10^{20}$ Stichproben ziehen. (Bsp. ist wohl von Leo Breimann, die genaue Quelle ist leider unbekannt.)

¹³³Sicherheitsrelevant gemäß der ASIL Einstufung (ASIL - Automotive Safety Integrity Level, siehe ISO 26262)

12.4 Vorgehensweise beim Aufbau des Klassifikators

Das strukturierte Vorgehen für das Design des Klassifikators ist in Abbildung 12.5 dargestellt. Zunächst werden die Merkmale im Rahmen eines Brainstormings von Experten bestimmt. Hierzu dient das in Kapitel 13.4 vorgestellte Modell der Einfädelsituation als Grundlage. Aus dem Pool der dadurch gefundenen 28 Merkmale wurden die 20 erfolgversprechendsten herausgesucht. In Kapitel 14 wird auf die Generierung dieser Merkmale und einige der notwendigen Vorarbeiten, wie zum Beispiel die Bestimmung von Kolonnen-spuren oder Objekthistogrammen, eingegangen. Die Eignung des SBRF und Designdetails sind Gegenstand der Darstellungen in Kapitel 15: Der SBRF wird mit einem einfachen Entscheidungsbaum EB verglichen, um dessen Vorteil als Ensemble-Verfahren zu diskutieren. Danach werden die Einflüsse eines Oversamplings der Klasse $y[n] = EFS$ sowie der einer Übergangsklasse $y[n] = ?EFS$ bestimmt und für eine erste Designanpassung genutzt. Im Anschluss findet die Merkmalsselektion statt. Auf dem so entworfenen Klassifikator werden die Ergebnisse auf Realszenarien am Ende des Ergebniskapitels 15 gezeigt.

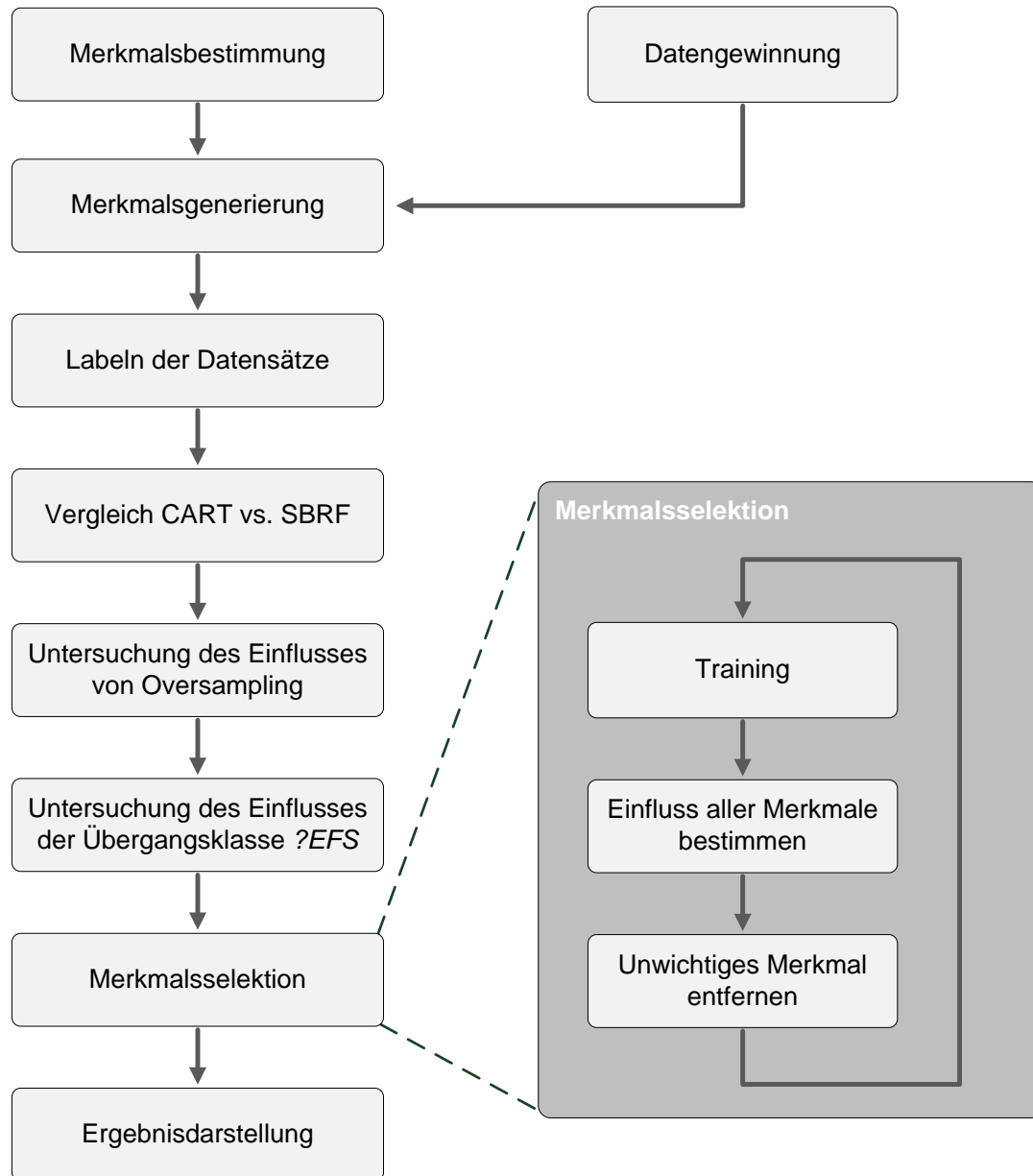


Abbildung 12.5: Strukturiertes Vorgehen für das Design des Klassifikators zur Erkennung von Einfädelsituationen, CART: Classification And Regression Tree, SBRF: Scenario Based Random Forest, EFS: Einfädelsituation

13 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel richtet sich der Fokus auf die theoretischen Grundlagen des Klassifikationsalgorithmus SBRF und auf dessen Nutzung bei der Merkmalsselektion. Die mathematischen Grundlagen der Kapitel 13.1 bis 13.3 stammen aus der Arbeit von Botsch (2009) und wurden für die Nutzung im Rahmen der Situationsanalyse für FAS adaptiert und gemeinsam veröffentlicht (Vgl. Reichel u. a. (2010a)). Des Weiteren wird ein allgemeines Modell als Grundlage der Merkmalsgenerierung für (Teil-)Situationen entwickelt. Aus dem Mangel an einer wissenschaftlichen Definition des Begriffes der Einfädelsituation wird diese aus dem Wortlaut und eigenen Erkenntnissen abgeleitet. Das Ende dieses Kapitels befasst sich mit der Darstellung der Merkmale, die für den Klassifikationsprozess genutzt werden.

13.1 Statistisches Rahmenwerk

Die von Sensoren und Vorverarbeitungsschritten innerhalb der primären Wahrnehmung stammenden Signale

$$\mathbf{s}_\ell[n] = [\mathbf{s}_\ell[n - Q + 1], \dots, \mathbf{s}_\ell[n]] \in \mathbb{R}^{1 \times Q} \quad (13.1)$$

attribuieren die Situation über einen Zeitraum QT . T bezeichnet hierbei das Abtastintervall und $\mathbf{s}_\ell[n]$ beschreibt somit eine Zeitserie eines endlichen Zufallsprozesses. Setzt sich die Beschreibung einer Situation aus mehreren Attributen zusammen, so wird diese im folgenden als *Szenarien-Ausschnitt* $\mathbf{S}[n] \in \mathbb{R}^{L \times Q}$ notiert, der sich aus L Signalen $\mathbf{s}_\ell[n]$, jedes über einen Zeitraum QT , aufspannt:

$$\mathbf{S}[n] = [\mathbf{s}_\ell[n - Q + 1], \dots, \mathbf{s}_\ell[n]], \text{ mit} \quad (13.2)$$

$$\mathbf{s}_\ell[k] = [\mathbf{s}_1[k], \dots, \mathbf{s}_L[k]]^T \in \mathbb{R}^L. \quad (13.3)$$

Im Zuge der Erkennung einer bestimmten (Teil-)Situation muss eine Funktion gefunden werden, die den gegebenen Szenarien-Ausschnitt $\mathbf{S}[n]$ auf eine Entscheidung $y[n] \in \{0, 1\}$

abbildet, wobei $y[n] = 1$ bedeutet, dass sich das EGO im Zeitschritt n in der Situation befindet und $y[n] = 0$ dies verneint. Dies entspricht demnach einem Klassifikationsproblem. Für die Lösung klassischer Klassifikationsprobleme können bekannte Maschinenlernverfahren angewandt werden, um die Zielattribute \mathbf{v} mit Hilfe eines gegebenen Sets an Mess- oder Beobachtungswerten \mathbf{u} zu schätzen. Auf der Basis hinreichend bekannter Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und den Zielattributen können die Mess- oder Beobachtungswerte \mathbf{u} als statistisch unabhängig und gleichverteilt angenommen werden (Vgl. Bishop (1995)). Im Falle der Erkennung einer Einfädelsituation sind die Zufallsvariablen innerhalb eines Szenarien-Ausschnittes, z.B. $\mathbf{s}[k]$ und $\mathbf{s}[k-1]$, nicht statistisch unabhängig. Die kleinste Einheit, die als statistisch unabhängig angesehen werden kann, ist ein komplettes *Szenario* $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{L \times (n_{\text{end}} + Q - 1)}$, das aus n_{end} Szenarien-Ausschnitten $\mathbf{S}[n]$, $n = 1, \dots, n_{\text{end}}$ gebildet wird. Für einen Klassifikator

$$f : \mathbb{R}^{L \times Q} \rightarrow \{0, 1\}, \mathbf{S}[n] \mapsto \hat{y}[n], \quad (13.4)$$

der den Szenarien-Ausschnitt $\mathbf{S}[n]$ auf eine Klasse

$$\hat{y}[n] = f(\mathbf{S}[n]) \in \{0, 1\} \quad (13.5)$$

abbildet, muss daher eine Kostenfunktion $\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$ definiert werden, die das gesamte Szenario berücksichtigt. Für die Berechnung der gesuchten Klassifikatorfunktion f muss das Risikofunktional

$$R(f) = \mathbb{E}_{\mathbf{S}, \mathbf{y}} \{ \mathcal{L}(\mathbf{y}, [f(\mathbf{S}[1]), \dots, f(\mathbf{S}[n_{\text{end}}])]) \} \quad (13.6)$$

minimiert werden, wobei $\mathbf{y} = [y[1], \dots, y[n_{\text{end}}]]$ und $\mathbb{E}_{\mathbf{S}, \mathbf{y}} \{ \cdot, \cdot \}$ die Erwartungen unter der Maßgabe der endlichen Rauschprozesse \mathbf{S} und \mathbf{y} darstellen. Da nur ein eingeschränktes *Trainings-Set*

$$\mathcal{T} = \{(\mathbf{S}_1, \mathbf{y}_1), \dots, (\mathbf{S}_M, \mathbf{y}_M)\} \quad (13.7)$$

bestehend aus M Szenarien $\mathbf{S}_m \in \mathbb{R}^{L \times (n_{\text{end}} + Q - 1)}$ und den zugehörigen Zielwerten $\mathbf{y}_m \in \{0, 1\}^{n_{\text{end}}}$ verfügbar ist, lässt sich in der Praxis das Risikofunktional aus Gleichung 13.6 nur näherungsweise bestimmen. Methoden wie das Kreuzvalidierungsverfahren oder out-of-bag estimation verwenden eine solche Näherung

$$\hat{R}(f) = \frac{1}{M'} \sum_{m=1}^{M'} \mathcal{L}(\mathbf{y}_m, [f(\mathbf{S}_m[1], \dots, \mathbf{S}_m[n_{\text{end}}])]) \quad (13.8)$$

des Risikofunktional $R(f)$, wobei M' Szenarien für die Trainingsphase ausgeklammert werden. Um Vorwissen einzubringen und die Aufgabe der Bestimmung der Abbildungsfunktion f von $\mathbf{S}[n]$ auf $\hat{y}[n]$ zu vereinfachen, kann diese in zwei Schritte separiert werden: einen ersten Schritt der Merkmalsgenerierung, bei dem $\mathbf{S}[n]$ in einen Merkmalsvektor $\tilde{\mathbf{x}}[n] \in \mathbb{R}^{\tilde{N}}$ transformiert wird, und einen zweiten Schritt der Klassifikation, bei dem $\tilde{\mathbf{x}}[n]$ auf $\hat{y}[n]$ abgebildet wird. Hierbei wird unterstellt, dass genügend Vorwissen für die Bildung von Merkmalsvektoren $\tilde{\mathbf{x}}[n]$ vorhanden ist, um das Klassifikationsproblem zu lösen und sogar zu vereinfachen. Die Abbildungsaufgabe erleichtert sich damit auf

$$g : \mathbb{R}^{\tilde{N}} \rightarrow \{0, 1\}, \tilde{\mathbf{x}}[n] \mapsto \hat{y}[n]. \quad (13.9)$$

Die optimale Abbildung g_B minimiert dabei das Risiko

$$R(g) = \mathbb{E}_{\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{y}} \{ \mathcal{L}(\mathbf{y}, [g(\tilde{\mathbf{x}}[1]), \dots, g(\tilde{\mathbf{x}}[n_{\text{end}}])]) \}, \quad (13.10)$$

wobei $\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{\mathbf{x}}[1], \dots, \tilde{\mathbf{x}}[n_{\text{end}}]] \in \mathbb{R}^{\tilde{N} \times n_{\text{end}}}$ die Merkmalsrepräsentation des Szenarios \mathbf{S} darstellt. So fasst z.B. die Zufallsvariable $\tilde{\mathbf{x}}[n]$ den Szenarien-Abschnitt $\mathbf{S}[n]$ in jedem Zeitschritt n zusammen. Nachdem auch hier das Problem besteht, dass nur eine limitierte Anzahl an Szenarien zur Verfügung steht, kann die Abbildungsfunktion g mittels Minimierung

$$R_{\text{emp}}(g) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathcal{L}(\mathbf{y}_m, [g(\tilde{\mathbf{x}}_m[1]), \dots, \tilde{\mathbf{x}}_m[n_{\text{end}}])]) \quad (13.11)$$

berechnet werden. Methoden wie der Kreuzvalidierung oder des bootstrapping stellen sicher, dass dies auch zu einer Minimierung von $R(g)$ führt (Vgl. Breiman u. a. (1984) bzw. Hastie u. a. (2001)). Für die Minimierung sollte die Performanz des Klassifikators auf der Ebene des Szenarios und nicht auf der Ebene eines einzelnen Zeitstempels getestet werden. Hiermit kann z.B. in sicherheitskritischen Anwendungen dem Umstand Rechnung getragen werden, dass eine einzelne Falsch-Positiv Klassifikation über die anzuwendende Kostenfunktion (13.6) stark bestraft wird, obgleich es sich womöglich um ein singuläres Ereignis handelt.

Der im Zuge dieser Dissertation gesuchte Algorithmus erkennt eine Einfädelsituation aus einem unbekannten Szenarien-Abschnitt zum Zeitschritt n , der Daten über die letzten Q Zeitschritte in sich trägt. Somit entspricht das Problem dem oben beschriebenen Rahmenwerk: Gesucht ist ein Klassifikator f , der zu jedem Zeitschritt über das Vorhandensein einer Einfädelsituation entscheidet. Führt man zudem den Schritt einer Merkmalsgenerierung ein, so teilt sich das Problem in die Suche nach geeigneten Merkmalen $\tilde{\mathbf{X}}$ und in die Bestimmung der Abbildungsfunktion g aus Gleichung (13.9). Die Grundlage bilden eingefahrene Daten aus dem Realverkehr (siehe Kap. 15.1).

13.2 Scenario-Based Random Forest

Eine mögliche Methode zur Lösung der im vorangegangenen Abschnitt dargelegten Problemstellungen stellt der *Scenario-Based Random Forest* (SBRF) Algorithmus dar (Vgl. Botsch und Nossek (2007)). Der SBRF Klassifizierer ist eine Erweiterung des *Random Forest* (RF) Algorithmus wie er von Breiman (2001) vorgestellt wurde. Dieser ist eine auf zufälligen Prozessen beruhende, aggregierte Version des bekannten *Classification And Regression Tree* (CART) (Vgl. Breiman u. a. (1984)), wobei er durch die Nutzung einer bagging technique gestärkt wird. Bei einem gegebenen Set von Eingangsvektoren \mathbf{u} und korrespondierenden Zielklassen \mathbf{v} verfolgt der RF die Idee, eine große Anzahl B von unterschiedlichen Klassifizierern $D_i(\mathbf{u})$, $i = 1, \dots, B$ mit niedrigem Bias zu generieren - zum Beispiel *full grown decision trees* - und dann ein Abstimmungsverfahren über die Einzelklassifikationsergebnisse aller Klassifizierern anzuwenden. Breiman (2001) hat gezeigt, dass der Algorithmus sich durch zusätzliche Bäume nicht überanpasst.

Innerhalb des Waldes bilden sich unterschiedliche Bäume durch verschiedene Zufallsquellen, wie zum Beispiel das *Bootstrapping*, bei dem jeder Baum $D_i(\mathbf{u})$ nur ungefähr 64% der zur Verfügung stehenden Szenarien M im Training benutzt. Somit existieren im gesamten RF immer Bäume, die ein bestimmtes Szenario nicht gesehen haben. Eine Performanzaussage (unbiased estimate) über den Generalisierungsfehler lässt sich somit leicht realisieren, indem genau der Teil des RF ausgewertet wird, der mit dem Szenario nicht trainiert wurde (Vgl. Breiman (1996)).

Die Erweiterung des RF zum SBRF betrifft das bootstrap-sampling auf Szenarienebene, welches eine Beachtung des zeitlichen Verlaufes der Daten über eine Situation sicherzustellen (Vgl. Botsch und Nossek (2007)). Des Weiteren kann ein Oversampling der Merkmalsvektoren $(\tilde{\mathbf{x}}[n], \mathbf{y}[n])$ in Hinblick auf die Kostenfunktion $\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$ in Betracht gezogen werden. Die Teile eines Szenarios, deren Falschklassifikation über die Kostenfunktion stärker bestraft werden, werden hierbei mehrfach in den Trainingsprozess eingeschleust.

13.3 Merkmalsselektion

Ensamble Klassifikationsmethoden wie der SBRF zeigen eine gute Performanz in der Generalisierung, und dies sogar in hochdimensionalen Merkmalsräumen. Aus diesem Grund kann der *out-of-bag* (oob) Erwartungswert eine entscheidende Rolle bei der Merkmalsselektion (feature selection) einnehmen. In dieser Arbeit wird für den Merkmalsselektionsprozess zunächst die baseline in Form des Generalisierungsfehlers $\hat{R}(g)$ durch ein Training mit allen Merkmalen bestimmt. Danach wird die Information, z.B. die des Merkmals j aus dem Merkmalsvektor $\mathbf{x}[n]$, entfernt und es wird erneut der oob Erwartungswert $\hat{R}(g)^{(j)}$ bestimmt. Die Entfernung des Informationsgehaltes geschieht durch die zufällige Vertauschung aller Einträge an der Stelle j des Merkmalsvektors all jener Szenarien $\tilde{\mathbf{X}}_m$, die nicht durch den SBRF in der Trainingsphase verwendet wurden. Die Differenz dieser beiden Generalisierungsfehler

$$\Delta^{(j)} = \hat{R}(g)^{(j)} - \hat{R}(g) \quad (13.12)$$

repräsentiert die Wichtigkeit des Merkmals j für den Klassifikationsprozess. Je größer der Unterschied $\Delta^{(j)}$ ist, desto wichtiger ist das untersuchte Merkmal. Diese Beurteilung wird nun für alle Einträge im Merkmalsvektor $\mathbf{x}[n]$ vorgenommen und das Merkmal mit dem geringsten positiven Einfluss wird entfernt. Dieser Prozess kann fortgesetzt werden, bis der Generalisierungsfehler $\hat{R}(g)$ einen nicht mehr akzeptablen Wert erreicht. Die Merkmalsrepräsentation eines Szenarios \mathbf{S} durch den reduzierten Merkmalsvektor ergibt sich somit zu

$$\mathbf{X}' = [\mathbf{x}[1], \dots, \mathbf{x}[n_{\text{end}}]] \in \mathbb{R}^{N \times n_{\text{end}}}, \text{ mit } N < \tilde{N}. \quad (13.13)$$

Die reduzierte Dimensionalität des Merkmalsraumes bietet einen nicht zu unterschätzenden Vorteil vor allem im Hinblick auf das Problem des *Fluchs der Dimensionalität* (siehe Fußnote 132 auf Seite 137). Bei zusätzlichem Oversampling der gemäß der unterlegten Kostenfunktion $\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$ wichtigen Klassen, wird die Merkmalsrepräsentation \mathbf{X} eines Szenarios transformiert zu $\mathbf{X}' \in \mathbb{R}^{N \times n'_{\text{end}}}$, wobei $n'_{\text{end}} > n_{\text{end}}$. Der so auf die Bedürfnisse der FAS angepasste und reduzierte Merkmalsvektor \mathbf{X}' kann auch für andere Maschinenlernverfahren genutzt werden.

13.4 Allgemeines Modell einer (Teil-)Situation

Auch wenn der in dieser Arbeit verwendete SBRF Klassifikator eine nicht modellbehaf-tete Methodik darstellt, bedingt die Idee der Generierung von Merkmalsvektoren mit dem Ziel des Einbringens von Vorwissen über die Situation die Notwendigkeit, eben diese Situation zu modellieren. Aus diesem Grund wird eine allgemeine Modellierung einer (Teil-)Situation vorgeschlagen, die sich am Aufbau einer Theateraufführung anlehnt: Die Situation wird durch die Handlungen eines Protagonisten, die Handlungen weiterer Charaktere, das Bühnenbild und die sich ergebenden Konstellationen beschrieben. Diese Elemente korrespondieren im Rahmen der FAS mit dem EGO, beteiligten dynamischen Objekten, der Umgebung sowie deren Konstellationen zueinander. Die Umgebung umfasst sowohl statische Objekte als auch Strukturelemente, wie zum Beispiel Fahrbahnmarkierungen. Um die Konstellationen - also „das Zusammentreffen und die Anordnung bestimmter Umstände“ (Langenscheidtredaktion (2010)) - evaluieren zu können, müssen Verkehrsregeln, Domänenspezifika und Sittenrechte berücksichtigt werden.

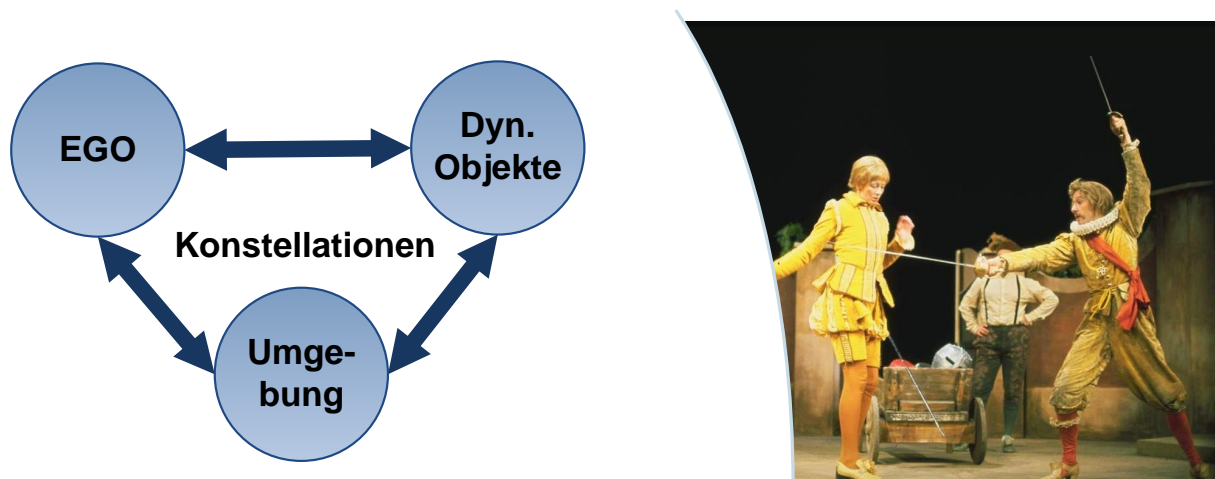


Abbildung 13.1: Links: Allgemeines Modell einer (Teil-)Situation, Rechts: Inspirationsquelle Theaterszene

In Abbildung 13.1 ist das so entwickelte allgemeine Modell dargestellt. Die explite Berücksichtigung dynamischer Verkehrsteilnehmer wird deren Bedeutung für die Situation gerecht. Da diese ihr Verhalten aus sich heraus beeinflussen können, sind sie in der Lage, den zukünftigen Verlauf wesentlich zu prägen. Allerdings ist die Unterscheidung nach dynamischem Objekt und Konstellation in einigen Fällen schwer zu treffen. Ein Einscherer beispielsweise ist ein dynamischer Verkehrsteilnehmer, der allerdings erst aufgrund der Lage zu anderen Objekten als solcher bezeichnet werden kann. Daher wird das an dieser Stelle vorgeschlagene Modell lediglich als Ausgangspunkt einer strukturierten Suche verstanden.

13.5 Definition der Einfädelsituation

Obwohl es sich bei einer Einfädelsituation (EFS) um einen alltäglichen Vorgang handelt, konnte in keinem gängigen Nachschlagewerk eine wissenschaftlichen Ansprüchen genügende Definition gefunden werden. Auch die Straßenverkehrsordnung bezieht sich im Paragraphen §7 nicht direkt auf die EFS, sondern vielmehr auf das Reißverschlussverfahren:

Ist auf Straßen mit mehreren Fahrstreifen für eine Richtung das durchgehende Befahren eines Fahrstreifens nicht möglich oder endet ein Fahrstreifen, so ist den am Weiterfahren gehinderten Fahrzeugen der Übergang auf den benachbarten Fahrstreifen in der Weise zu ermöglichen, dass sich diese Fahrzeuge unmittelbar vor der Verengung jeweils im Wechsel nach einem auf dem durchgehenden Fahrstreifen fahrenden Fahrzeug einordnen können (Reißverschlußverfahren). (Vgl. §7 Absatz 4 StVO)

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine eigene Definition abgeleitet. Der Ursprung des Begriffes *Einfädeln* liegt in der Tätigkeit des Nähens und beschreibt den Vorgang des Beförderns eines unhandlichen Fadens durch ein kleines Nadelöhr. So impliziert bereits die Ethymologie der *Einfädelsituation*, dass es sich um einen koordinativ anspruchsvollen Vorgang handelt und bestimmte Zwangsbedingungen präsent sind. Eine solche entsteht bei der Einfädelsituation durch eine Verknappung der Verkehrswege, die eine notwendige Anpassung des Handelns nach sich zieht. Tritt im fließenden Verkehr ein Fahrstreifenende oder ein fahrstreifenblockierendes Hindernis auf, entsteht durch die allen Teilnehmern gleiche Intention des Vorwärtkommens eine EFS. Dabei sind immer zwei benachbarte Fahrzeugkolonnen betroffen. Des Weiteren kann von einer EFS nur dann gesprochen werden, wenn hinreichend dichter Verkehr vorhanden ist, der ein Einfädeln notwendig macht. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine EFS damit wie folgt definiert:

Eine **Einfädelsituation** (EFS) liegt vor, wenn sich eine Fahrzeugkolonne im weiteren Verlauf aufgrund einer äußeren Zwangsbedingung in eine benachbarte Fahrzeugkolonne im laufenden Verkehr einordnet.

Mit dieser Definition ist auch das Ende einer EFS bestimmt: Da eine solche nur vorliegt, wenn *im weiteren Verlauf* zwei Fahrzeugkolonnen verschmelzen, so endet sie nach dem Punkt, an dem sich das vorderste Fahrzeug auf dem wegfallenden Fahrstreifen befindet. Der Beginn einer EFS ist bewusst undefiniert belassen worden, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass eine Situation sich aus der Perspektive des Betrachters - in diesem Fall aus Sicht der Assistenzfunktion - ergibt. Dies ist auch der Grund für die Einführung der Transitionsklasse ?EFS, die den Übergang zwischen !EFS und EFS markiert und immer dann genutzt wurde, wenn mehrere Experten keinen gleichen Anfangspunkt bestimmen konnten.

Je nach Fahrstreifenzugehörigkeit des EGO kann eine EFS grundsätzlich in zwei Ausprägungen vorliegen:

Die **migrierende Fahrzeugkolonne** wird in ihrer Weiterfahrt behindert und muss sich daher bei fließendem Verkehr in eine Nachbarkolonne einreihen.

Die **aufnehmende Fahrzeugkolonne** wird an der Weiterfahrt nur durch Einscherer aus der migrierenden Kolonne, aber nicht durch weitere Hindernisse eingeschränkt.

Aus dem eigenen Erfahrungsschatz heraus kann davon ausgegangen werden, dass in einem überwiegenden Teil der EFS in Europa je eine migrierende und eine aufnehmende Kolonne vorhanden sind. Allerdings kann es auch passieren, dass beide Fahrzeugkolonnen gezwungen werden, sich zu einer neuen zu vereinigen. Dies muss bei einer automatischen Zuordnung berücksichtigt werden: Aus dem Vorhandensein einer migrierenden Kolonne kann nicht zwingend auf die Existenz einer aufnehmenden geschlossen werden. Des Weiteren ist der Fall denkbar, dass es mehr als zwei Kolonnen in die Einfädelsituation einbezogen sind.

Die aufgenommenen Szenarien, die die Grundlage für die hier vorgestellte Einfädelsituationseerkennung bilden, sind ausschließlich Daten aus der AFK. Zum einen sollten die Forschungsarbeiten zur Modellierung und Erkennung einer EFS dadurch fokussiert werden. Zum anderen sind mit der Zuordnung zur AFK bzw. MFK auch gänzlich verschiedene Eingriffskonzepte seitens der Funktion konnotiert: In der weiterführenden Kolonne müssen vor allem Naheinscherer bei der Längsführung berücksichtigt werden. In einer wegfalenden Kolonne muss ggf. ein vollständiger Stillstand trotz fehlendem unüberfahrbaren Hindernis gewährleistet werden (bestes Beispiel ist ein Autobahnende wie in Abbildung 12.1). Die Auswahl des relevanten Führungsfahrzeuges für eine Längsassistentz gehorcht gänzlich anderen Regeln und die Auswirkungen auf eine Querführungsassistentz reichen je nach Grad der Automatisierung von Nichtstun bis hin zum automatischen Spurwechsel.

13.6 Modellierung der Einfädelsituation

Auf Grundlage des am Anfang dieses Kapitels vorgestellten allgemeinen Modells einer Situation, entstand bei einem Brainstorming von Experten ein initiales Set von 28 Merkmalen (6 über das EGO, 2 über die Umgebung und 20 zu den Konstellationen). Von diesen 28 wurden nach den Kriterien „erwarteter Erkenntnisgewinn“ und „Aufwand der Generierung“ 20 ausgewählt, die in den Merkmalsselektionsprozess einfließen (6 über das EGO, 4 über die Umgebung und 12 zu den Konstellationen). Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung aller 20 Merkmale gegeben, deren Erwartungswerte, Standardabweichungen und Bereiche für die Klassen EFS und !EFS in Tabelle 13.1 aufgeschlüsselt sind. Die notwendigen und selbst entwickelten Verfahren zur Merkmalsgenerierung - Kolonnenspuren (KS), Kolonnenspурwechsel (KSW) und Radar-Reflex-Histogramme (RRH) - werden in Kapitel 14 detailliert dargestellt.

13.6.1 EGO Merkmale

Der EGO-Master in der primären Wahrnehmung liefert stetig Daten über den dynamischen Zustand des EGO. Die folgenden Merkmale entspringen der Beobachtung, dass es vor einer EFS bei dichtem Verkehr zu typischen Stop-and-Go-Mustern kommt.

MeanAcceleration: Durchschnitt der EGO Beschleunigung über die letzten N Zeitschritte $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

MeanOfAbsoluteValueOfAcceleration: Durchschnitt der Beträge der EGO Beschleunigung über die letzten N Zeitschritte $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

MeanEgoVelocity: Durchschnitt der EGO Geschwindigkeit über die letzten N Zeitschritte $\left[\frac{m}{s}\right]$

RelativeStoppedTime: Anteil der Zeitschritte, in denen die EGO Geschwindigkeit unter dem Grenzwert lag, im Verhältnis zur historisch betrachteten Gesamtmenge N an Zeitschritten $[]$

NoOfSignChanges: Anzahl an Vorzeichenwechseln der EGO Beschleunigung im betrachteten Zeitraum, wobei eine Hystere zur Absicherung gegen Rauschen um die Nulllage verwendet wird $[]$

IntervalMinToMaxVelocity: Differenz zwischen der Maximal- und Minimalgeschwindigkeit über einen Betrachtungszeitraum $\left[\frac{m}{s}\right]$

13.6.2 Merkmale aus Konstellationen

Das in einer EFS zu beobachtende Verschmelzen zweier „Fahrzeugschlangen“ wird an dieser Stelle etwas genauer beleuchtet. Technisch kann in diesem Fall von dem Verschmelzen zweier Ströme gesprochen werden. Als typische Maße können hieraus die Verkehrsdichte k_i und die Verkehrsstärke q_i berechnet werden, wobei der Index i mehrere auf einer Fahrbahn existierende Flüsse unterscheidet, N_i die Anzahl an Fahrzeugen und v_i die mittlere Reisegeschwindigkeit innerhalb dieser Flüsse bezeichnen (gemäß der Begriffsbestimmungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV (2000)):

$$k_i = \frac{N_i}{\delta x} = \frac{q_i}{v_i} \quad (13.14)$$

$$q_i = \frac{N_i}{\delta t} \quad (13.15)$$

Die Verkehrsdichte k_i beschreibt die Fahrzeuge pro Streckenabschnitt und die Verkehrsstärke q_i die Fahrzeuge pro Zeiteinheit. Auf der gesamten Fahrbahn errechnen sich diese Größen mit

$$K = \frac{\sum N_i}{\delta x} \text{ und} \quad (13.16)$$

$$Q = \frac{\sum N_i}{\delta t}. \quad (13.17)$$

Setzt man voraus, dass der betrachtete Streckenabschnitt keine Zu- oder Abfahrten aufweist, so muss die Verkehrsdichte über die gesamte Fahrbahn K kurz vor und nach der Einengung gleich sein. Das gilt ebenso für die und Verkehrsstärke über die gesamte Fahrbahn Q :

$$K_{vorEFS} = K_{nachEFS} \quad (13.18)$$

$$Q_{vorEFS} = Q_{nachEFS} \quad (13.19)$$

$$\sum N_{i,vorEFS} = \sum N_{i,nachEFS} \quad (13.20)$$

Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen definiert weiterhin eine Fahrzeugkolonne als

Fahrzeuge einer Fahrzeugreihe, von denen jedes außer dem ersten in seinem Geschwindigkeitsverhalten durch mindestens ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst wird. (Vgl. FGSV (2000))

In Anlehnung an die Spuren, die eine solche Fahrzeugkolonne im Schnee hinterlassen würde, wird der räumliche Verlauf solcher Fahrzeugkolonnen als Kolonnenspuren (KS) bezeichnet:

Eine **Kolonnenspur** beschreibt eine Bahn, auf der eine Menge an Fahrzeugen hintereinander fährt.

Das in dieser Arbeit verwendete Modell beschreibt dabei die Skelettlinie der Fahrzeugkolonne, was allerdings nicht notwendigerweise die einzige Beschreibungsform ist. Allerdings ist es wichtig, den Anfang und das Ende einer solchen Kolonnenspur zu definieren:

Eine Kolonnenspur **beginnt** an der Stelle, an der sich durch die Einzelbahnen der beteiligten Fahrzeuge in Kolonnenspurrichtung eine bevorzugte Bahn ausprägt. Sie **endet**, wenn eine gemeinsame Bahn nicht mehr erkennbar ist oder die Kolonnenspur durch eine signifikante Änderung im Verlauf in eine andere Kolonnenspur übergeht.

In dieser Arbeit werden zunächst die Kolonnenspur bestimmt (siehe Kap. 14.2). Aus dem Bestimmungsprozess lassen sich bereits einige Merkmale zur Ausgeprägtheit gewinnen. Im zweiten Schritt werden Kolonnenspuren auf absehbare Enden durch Übergang in andere

Kolonnenspur geprüft, um daraus weitere Merkmale zu generieren. Zudem können Wechsler zwischen den Kolonnenspur gefunden und genutzt werden. Die folgenden Merkmale entstammen diesen Vorverarbeitungsprozessen:

NoOfHypoFusionAheadEgo: Anzahl an Fusionen von Kolonnenspursegmenthypothesen ¹³⁴ vor dem EGO []

DensityHypoFusionsAheadEgo: Anzahl an Fusionen von Kolonnenspursegmenthypothesen vor dem EGO, bezogen auf die Anzahl mit Kolonnenspursegmenthypothesen befüllten Streifen der Intervallkarte []

TempGradientHypoFusionGeneration: Zeitlicher Gradient des Merkmals DensityHypoFusionsAheadEgo [$\frac{1}{s}$]

TempGradientSegmentHypoGeneration: Zeitlicher Gradient der Instanzierung neuen Kolonnenspursegmenthypothesen vor dem EGO [$\frac{1}{s}$]

DistanceToCTIntersection: Abstand bis zum Schnittpunkt einer benachbarten Kolonnenspur mit der EGO-Kolonnenspur [m]

SumOfDeltaYInIntervals: Abstand zwischen der benachbarten Kolonnenspur und der EGO-Kolonnenspur in jedem betroffenen Streifen der Intervallkarte [m]

MeanGradientOfCTClothoidDiff: Durchschnittliche Differenz der Steigungen der EGO-Kolonnenspur und der benachbarten Kolonnenspur in den gefüllten Streifen der Intervallkarte [rad]

LaneChangersAheadEgo: Anzahl an detektierten Kolonnenspurwechsel vor dem EGO, wobei Wechsler in die EGO-Kolonnenspur positiv und Wechsler aus der EGO-Kolonnenspur negativ gezählt werden []

Neben einer solch komplexen Vorverarbeitung soll auch ein weiterer Ansatz getestet werden: Aus den Positionsdaten der dynamischen Verkehrsteilnehmer können Verteilungsdiagramme - im Folgenden Radar-Reflex-Histogramme genannt - über den Straßenquerschnitt erstellt werden. Außerhalb einer Einfädelsituation entspricht die Verteilung auf einer mehrspurigen Fahrbahn der Einteilung in Fahrstreifen. Innerhalb einer Einfädelsituation kann man eine Verteilungsverschiebung beobachten. Dieser Effekt wird mit den folgenden Merkmalen abgebildet:

NoOfDynReflexesInLeftROI: Anzahl der dynamischen Radarreflexe links von der EGO-Kolonnenspur über einen definierten Zeitraum []; Grundlage ist das aufgestellte dynamische Radar-Reflex-Histogramm

DistributionDynReflexesInLeftROI: Anzahl der betroffenen Moden im Radar-Reflex-Histogramm [], deren Existenz über die Klassenhäufigkeit definiert ist

¹³⁴siehe Kap. 14.2

13.6.3 Umgebungsmerkmale

Die folgenden Merkmale widmen sich der Ursachenbestimmung für eine Einengung, in deren Folge sich eine EFS ergibt. Neben der direkten Suche nach Hindernissen wird auch ein RRH aller statischen Objekte verwendet.

GridMapOccupancy: Verhältnis der Fläche des als belegt gekennzeichneten Raumes zum gesamten betrachteten Raum, der seitlich versetzt entlang der EGO-Kolonnenspur aufgespannt wird; Grundlage bildet die intervallbasierte Belegungsliste $\left[\frac{m^2}{m^2}\right]$

DistanceToObstacle: Longitudinaler Abstand zum nächsten Hindernis in der Nachbar-Kolonnenspur mit einer vorzugebenden Mindestbreite $[m]$

NoOfStatReflexesInLeftROI: Anzahl der statischen Radarreflexe links der EGO-Kolonnenspur über einen definierten Zeitraum $[\Delta t]$; Grundlage ist das aufgestellte statische Radar-Reflex-Histogramm

DistributionStatReflexesInLeftROI: Anzahl der betroffenen Moden im Radar-Reflex-Histogramm, deren Existenz über die Klassenhäufigkeit definiert ist $[\Delta f]$

13.6.4 Merkmale dynamischer Objekte

Die EFS zeichnet sich vor allem durch eine spezielle Konstellation der dynamischen Verkehrsteilnehmer aus. Auch die Kolonnenspurwechsler sind der Quelle Konstellationen zugeordnet, daher fließen keine Merkmale einzelner dynamischer Objekte in die EFS Erkennung ein.

EGO	MW(EFS)	STD(EFS)	RANGE(EFS)	MW(!EFS)	STD(!EFS)	RANGE(!EFS)
MeanAcceleration [$\frac{m}{s^2}$]	0,0957	0,52	-1,85 .. 2,42	-0,0396	0,5022	-3,02 .. 3,59
MeanOfAbsoluteValueOfAcceleration [$\frac{m}{s^2}$]	0,374	0,373	0,0005 .. 2,41	0,341689	0,370	0,0 .. 3,59
MeanEgoVelocity [$\frac{m}{s}$]	3,54	1,86	0,191 .. 9,51	4,26	2,91	-0,0115 .. 13,3
RelativeStoppedTime []	0,0	0,00	0,0 .. 0,0	0,0936	2,91	0,0 .. 1,0
NoOfSignChanges []	0,298	0,457	0,191 .. 9,51	0,418	0,493	-0,0115 .. 13,3
IntervalMinToMaxVelocity [$\frac{m}{s}$]	0,0	0,0	0,0 .. 0	1,6 10^{-5}	3,75 10^{-4}	0,0 .. 0,0115
Konstellationen						
NoOfHypoFusionAheadEgo []	10,0	11,2	0,0 .. 53,0	8,73	13,3	0,0 .. 66,0
DensityHypoFusionsAheadEgo []	0,403	0,448	0,0 .. 2,12	0,349	0,532	0,0 .. 2,64
TempGradientHypoFusionGeneration [$\frac{1}{s}$]	10^{-6}	4 10^{-6}	-4,9 10^{-5} .. 1,1 10^{-5}	0,0	4 10^{-6}	5 -7,2 10^{-5} .. 1,7 10^{-5}
TempGradientSegmentHypoGeneration [$\frac{1}{s}$]	0,0	4 10^{-6}	-1,8 10^{-5} .. 1,1 10^{-5}	0,0	4 10^{-6}	-2,8 10^{-5} .. 1,4 10^{-5}
DistanceToCTIntersection [m]	931,0	251,7	-2,24 .. 1000,0	996,4	58,9	-1,51 .. 1000,0
SumOfDeltaYInIntervals [m]	1,94	33,5	0,0171 .. 1000,0	21,0	139,7	0,0806 .. 1000,0
MeanGradientOfCTClotoidDiff [rad]	0,00943	0,00838	0,0 .. 0,0426	0,00397	0,00418	0,0 .. 0,0358
LaneChangersAheadEgo []	0,534	0,714	0,0 .. 3,0	0,293	0,806	0,0 .. 5,0
NoOfDynReflexesInLeftROI []	95,8	50,1	0,0 .. 230,0	136,9	64,6	0,0 .. 279,0
DistributionDynReflexesInLeftROI []	0,221	0,126	0,0 .. 1,0	0,167	0,102	0,0 .. 1,0
Umgebung						
GridMapOccupancy [$\frac{m^2}{m^2}$]	0,152	0,127	0,0 .. 0,525	0,211	0,189	0,0 .. 0,85
DistanceToObstacle [m]	37,96	22,34	11,5 .. 100,0	42,01	29,05	4,5 .. 100,0
NoOfStatReflexesInLeftROI []	7,71	17,0	0,0 .. 89,0	2,69	10,4	0,0 .. 89,0
DistributionStatReflexesInLeftROI []	0,168	0,281	0,0 .. 1,0	0,0949	0,244	0,0 .. 1,0

Tabelle 13.1: Erwartungswert, Standardabweichung und Bereich aller Merkmale für die Klassen EFS und !EFS

14 Methoden der Merkmalsgenerierung

Motiviert durch die Möglichkeit mit Hilfe einer sinnvollen Merkmalsgenerierung aus den Sensor(roh)daten Vorwissen in die Klassifikation einzubringen, sind im Rahmen der Dissertation die folgenden drei Methodiken entstanden: das Radar-Reflex-Histogramm, die Detektion und Verfolgung von Kolonnenspuren sowie die Detektion von Kolonnenspurwechslern. Die folgenden Abschnitte beschreiben diese Methoden, die auch für andere Situationsklassifikationen als die der EFS-Erkennung genutzt werden können.

14.1 Radar-Reflex-Histogramme

Bei dem Radar-Reflex-Histogramm (RRH) handelt es sich um eine einfache, aber wirkungsvolle Methodik, aus den Punkt-Objektdaten eines Radarsensors Merkmale für die Klassifikation der EFS zu generieren. Das Histogramm spiegelt die Häufigkeitsverteilung von Reflexpunkten lateral zur Fahrzeugausrichtung wider. Bei dieser Variante wird ein gerader Straßenverlauf über das Aufmerksamkeitsgebiet angenommen. Kurven können allerdings leicht durch die Annahme eines Fahrschlauches berücksichtigt werden.

Zunächst werden zwei Gruppen gebildet: eine für dynamische und eine für statische Objekte. Für beide Gruppen werden getrennte Histogramme erstellt. Eingang in diese Histogramme erlangen nur Reflexpunkte innerhalb eines Aufmerksamkeitsbereiches nach einer Plausibilitätsprüfung über Gütekriterien. Die Einträge sind mit einer Verfallsdauer versehen und werden nach deren Ablauf dieser aus dem Histogramm gelöscht.

In Abbildung 14.1 sind drei Beispiele für dynamische RRH dargestellt. Dabei entwickelt sich die Situation von links nach rechts: Zunächst liegt keine EFS vor und bis auf einzelne Kolonnenspurwechsler fahren die Fahrzeuge in drei Kolonnen. Jede dieser drei ist im RRH eindeutig über die Ausprägung einer separaten Verteilung zu erkennen. Da sich das EGO im mittleren Fahrstreifen befindet, liegt der Nullpunkt der Fahrzeug-Y-Achse, die lateral zum Fahrzeug ausgerichtet ist, im Zentrum der Abszissenachse. Im mittleren Diagramm befindet sich das EGO in der aufnehmenden Fahrzeugkolonne, in die Fahrzeuge aus der rechten einscheren. Im RRH ergibt sich dadurch der Effekt des Überfließens der rechten Verteilung in die mittlere. Das rechte RRH zeigt die Situation nach dem Passieren

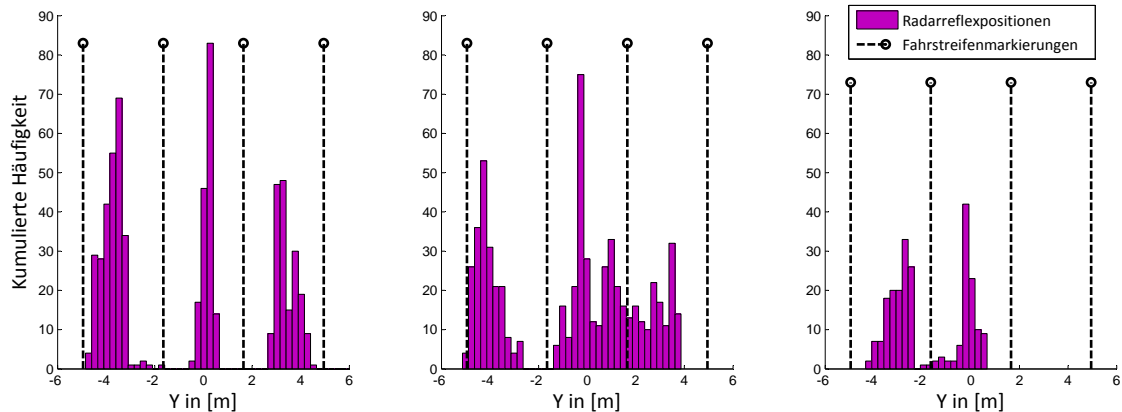


Abbildung 14.1: Dynamisches RRH, Links: Vor einer EFS auf einer dreispurigen Straße im Stau, Mitte: Während einer EFS, Rechts: Nach Passieren der Engstelle auf der dann zweispurigen Straße in der Stauauflösung

der Engstelle: Die Fahrbahn wurde auf zwei Fahrstreifen reduziert und die Stausituation entspannt sich. Daher zeigt sich in den verbleibenden Fahrstreifen auch eine niedrigere Häufigkeit - der größere Abstand zwischen den Fahrzeugen führt dazu, dass weniger in die Akkumulation eingehen.

14.2 Kolonnenspuren

Der Bildung von Kolonnenspuren liegt die Beobachtung zu Grunde, dass es im dichten Verkehr auf mehrspurigen Fahrbahnen zur Ausbildung von Kolonnen kommt. Ziel ist eine computerinterne Repräsentation der Verläufe dieser Kolonnen sowie die Verknüpfung weiterer Merkmale mit diesen (z.B. Kolonnenspurgeschwindigkeitsverlauf, EGO-Zugehörigkeit). Basis bildet eine Intervallkarte, die im Rahmen der Dissertation von Bouzouraa (2012) entwickelt wurde. Es handelt sich dabei um eine 2D Merkmalskarte, wobei die Umgebung um das Fahrzeug nur entlang einer Dimension in einzelne Intervalle diskretisiert wird. Innerhalb dieser können beliebige Informationen entlang der verbleibenden Dimension zugeordnet werden. Im konkreten Anwendungsfall werden die Intervalle entlang der EGO-Fahrzeuglängsachse aufgesetzt und erstrecken sich auf ein Gebiet von -45m hinter dem EGO bis +45m vor dem EGO. Die Breite eines Intervalls beträgt 1,8m, so dass sich der Aufmerksamkeitsbereich in 50 Intervalle gliedert. Des Weiteren stehen hinter jedem Eintrag in der Karte ein Kalman-Filter sowie eine Liste von Attributen. Ein einzelner Eintrag wird dabei als potentieller Teil einer Kolonnenspur gesehen und daher als *Kolonnenspursegmenthypothese* (KSSH) bezeichnet. Im Folgenden wird beschrieben, wie und welche Informationen als KSSH in der Intervallkarte hinterlegt werden. Des Weiteren wird beschrieben, wie aus den einzelnen KSSH *Kolonnenspurchypothesen* (KSH) detek-

tiert und daraus *Kolonnenspuren* (KS) gebildet und über die Zeit verfolgt werden. Die Erläuterungen folgen dabei dem in Abbildung 14.2 gezeigten Verlauf der KS-Bildung. Für die Details zur Intervallkarte im Allgemeinen, wie zum Beispiel die Eigenbewegungskompensation oder die Sensormodellierungen, wird an dieser Stelle auf Bouzouraa (2012) verwiesen.

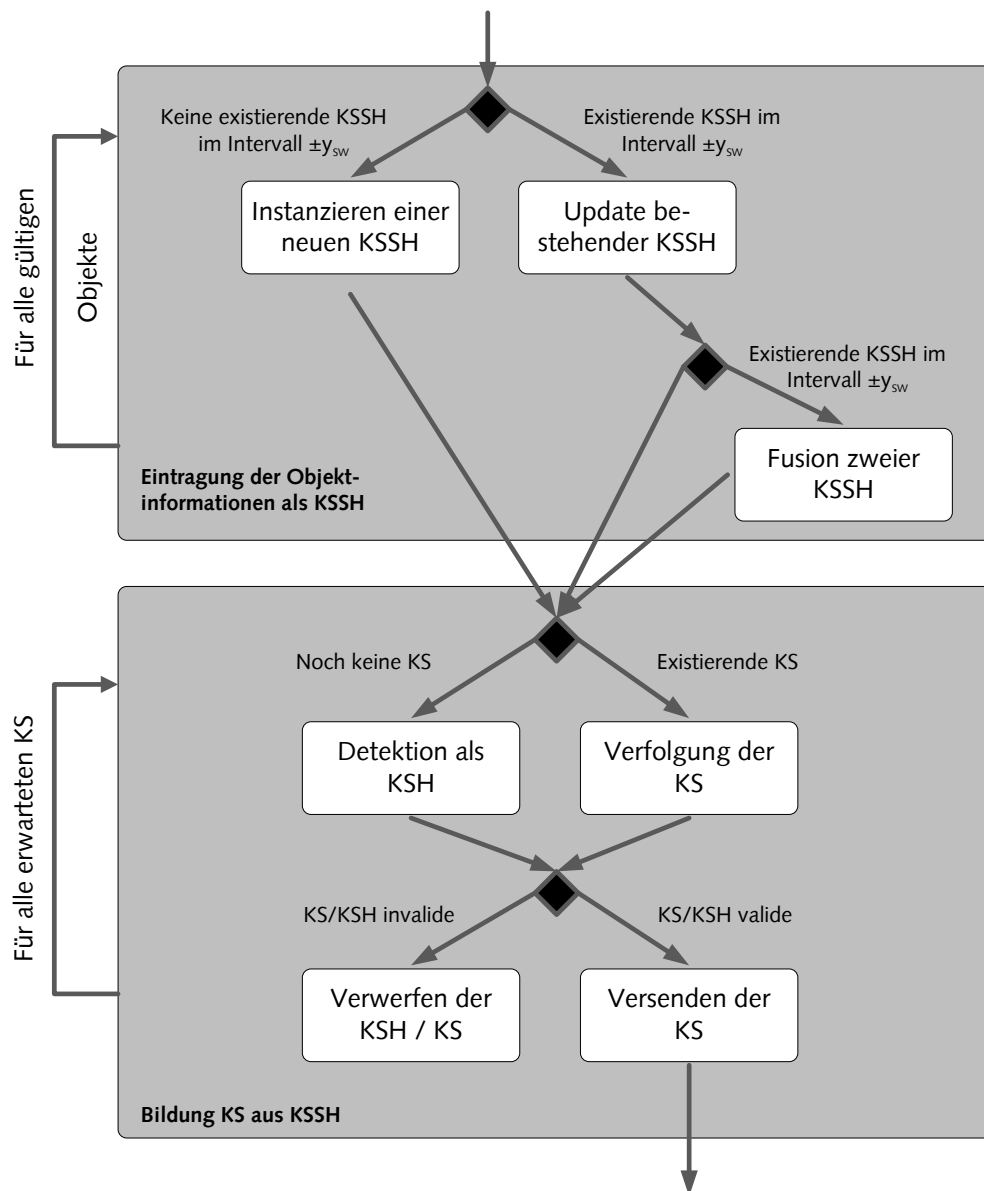


Abbildung 14.2: Ablauf der Kolonnenspurbildung auf der Basis einer Intervallkarte

14.2.1 Bildung der Kolonnenspursesegmenthypothesen (KSSH)

Eine KSSH trägt zum einen die Information in sich, welche Daten welcher Objekte - und speziell ob Daten des EGO - für die KSSH verwendet wurden. Zum Zweiten beinhaltet sie einen Kalman-Filter mit dem Zustandsvektor

$$\mathbf{X}_{KSSH} = \begin{bmatrix} y & v_x & v_y \end{bmatrix}^T, \quad (14.1)$$

wobei y die Position in lateraler Richtung innerhalb des Intervalls der Karte und v_x sowie v_y die Geschwindigkeiten longitudinal wie lateral bezeichnen. Die Systemmatrix \mathbf{A}_{KS} spiegelt die statischen Erwartungen an ein Element einer Kolonnenspur wider: Die Fahrzeuge sollten in einer Reihe hintereinander alle über denselben Punkt fahren, wobei die Kolonne an diesem Punkt ihre Längsgeschwindigkeit beibehält

$$\mathbf{A}_{KS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14.2)$$

Die initialen Werte der Kovarianzmatrix \mathbf{P}_{KS} und der Rauschmodelle sowohl für das Modell \mathbf{Q}_{KS} als auch für den Sensor \mathbf{R}_{KS} lauten

$$\mathbf{P}_{KS,initial} = \begin{bmatrix} \sigma_{KS}^3 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \end{bmatrix}, \quad (14.3)$$

$$\mathbf{Q}_{KS,initial} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad (14.4)$$

$$\mathbf{R}_{KS,initial} = \begin{bmatrix} 8\sigma_{KS}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (14.5)$$

mit $\sigma_{KS} = 0.6m$ als Standardabweichung der Lateralposition. Mit dem Eintreffen neuer Informationen über dynamische Objekte werden diese zunächst plausibilisiert. Für ein Objekt innerhalb des Bereiches, den die Intervallkarte abdeckt, wird im Folgenden überprüft, ob an der y -Position im betreffenden Intervall bereits eine KSSH existiert. Hierbei wird in

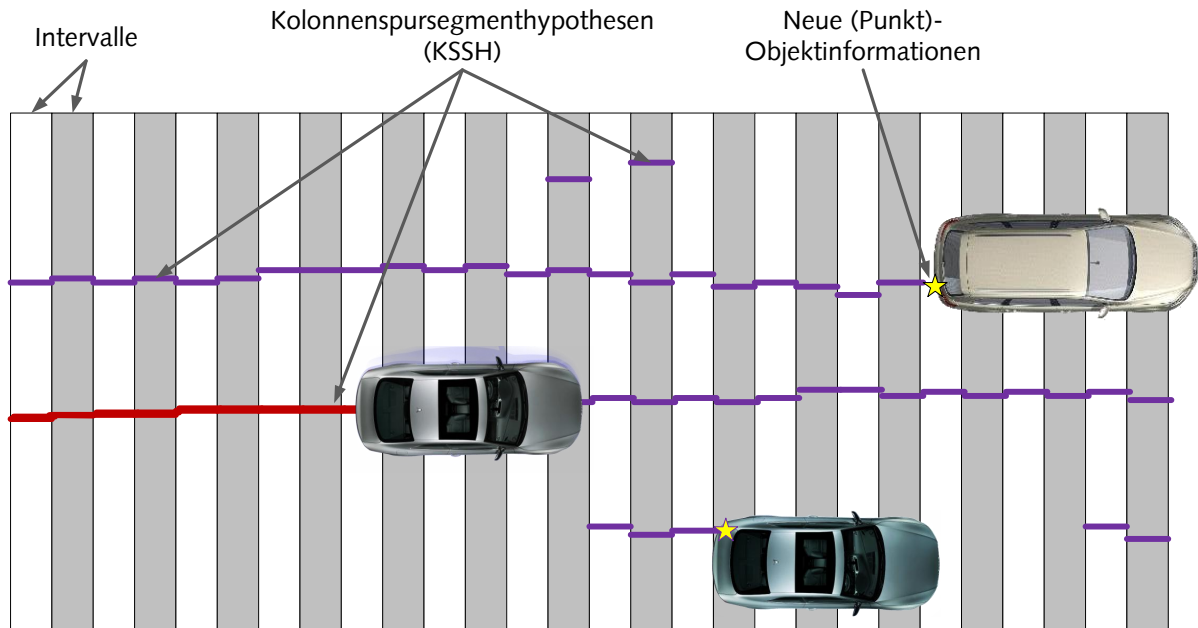


Abbildung 14.3: Intervallkarte mit eingetragenen Kolonnenspurssegmenthypothesen (KSSH)

einem Bereich um den Bezugspunkt des Objektes gesucht, wobei dieser im konkreten Fall a-priori festgelegt wird. Es wäre ebenso denkbar, den Einzugsbereich der KSSH aufgrund der Kovarianzmatrix \mathbf{P}_{KS} anzupassen. Sollte noch keine KSSH im Suchbereich existieren, wird eine neue instanziiert. In allen anderen Fällen wird für die nächste KSSH mit den Informationen des Objektes ein Kalman-Filter Update durchgeführt. Dadurch verändert sich die y-Position der KSSH. Kommen sich dadurch zwei KSSH zu nahe, werden sie ebenfalls über ein Kalman-Filter Update fusioniert.

In Abbildung 14.3 wird eine Intervallkarte mit bereits existierenden KSSH schematisch aufgezeigt. Die Informationen des EGO als auch der anderen Objekte finden Eingang in die entsprechenden KSSH. Alle vom EGO überfahrenen KSSH sind rot gekennzeichnet.

14.2.2 Bildung der Kolonnenspuren (KS)

Die Bildung der KS aus den KSSH hat zum Ziel, eine Beschreibung in Form von Klothoidenparametern für eine linke, eine rechte und eine mittlere KS zu liefern, wobei die Annahme zu Grunde liegt, dass sich das EGO in der Mitte aufhält.¹³⁵ Solange nicht alle drei erwarteten KS vorliegen, wird ein Detektionsschritt für die noch gesuchten KS

¹³⁵Für eine Herleitung der Berechnung von Klothoiden aus einer Menge von Punkten in einer Ebene siehe Anhang E

durchgeführt. Einmal vorliegende KS(en) werden in nachfolgenden Zeitschritten nicht mehr detektiert, sondern lediglich verfolgt.

Detektion von Kolonnenspurchypothesen (KSH)

Die Detektion verkettet einzelne KSSH zu KSH. Hierzu werden die hinter dem EGO liegenden KSSH in linke, rechte und mittige KSSH unterteilt. Dies ist in der Historie einfach, da in jeder KSSH gespeichert wird, ob das EGO diese überfahren hat. Existiert eine kritische Menge an KSSH in der Historie, wird der Verlauf mit einer Funktion ersten Grades approximiert. Eine Extrapolation dieser Geraden bildet die Mitte eines Suchbereichs für die Verkettung weiterer KSSH vor dem EGO. Gesucht wird nur in k Intervallen vor der vordersten bereits hinzugefügten KSSH. Wird eine neue KSSH gefunden, so wird die Geradenapproximation ein weiteres Mal für n Intervalle durchgeführt und als Ausgangsbasis einer weiteren Suche genutzt. Es ist somit möglich, $k - 1$ Intervalle zu überspringen, wobei die Erfahrung gezeigt hat, dass dies im hinreichend dichten Verkehr nicht notwendig ist. Im Falle des Findens mehrerer zugehöriger KSSH im kommenden Intervall werden mehrere KSH gebildet, jeweils mit einer der in Frage kommenden KSSH und der bis dahin aufgebauten Historie.

Als Bewertungskriterium für die Güte bzw. die Validität der KSH werden folgende Maße ausgewertet:

- Maximale Entfernung der KSSH-Punkte zum Klothoidenverlauf
- Krümmungsradius der Klothoide
- Parallelität zu den Nachbar-KSH bzw. Nachbar-KS
- Anzahl zugeordneter KSSH
- Anzahl an übersprungenen Intervallen, die zwar durch die KS abgedeckt werden, aber keine KSSH enthalten

Verfolgung von Kolonnenspuren (KS)

Ist aus dem letzten Zeitschritt eine KS bekannt, so wird diese lediglich verfolgt, auf einen Detektionsschritt wird verzichtet. Hierzu wird die Eigenbewegung zum letzten Zeitschritt kompensiert und die Klothoide als Schablone auf die Intervallkarte gelegt. In Abbildung 14.4 ist die Verfolgung von KS(en) visualisiert. Um die Ausgangs-KS wird ein Suchbereich definiert, der diese nicht nur seitlich ausdehnt, sondern auch über l weitere Intervalle extrapoliert. In diesem Bereich werden alle KSSH neu assoziiert. Sollten in einem Intervall mehrere gefunden werden, so wird die zur Ausgangs-KS am nächsten liegende genutzt. Die Berechnung der verfolgten KS erfolgt aus den somit neu verketteten KSSH. An dieser Stelle wird auch deutlich, warum hier von einer Verfolgung und nicht von einem Tracking

gesprochen wird: Im Feld der Fahrerassistenz ist der Begriff Tracking mit der Nutzung eines (Kalman-)Filters konnotiert. Dieser wird bei der Verfolgung der KS jedoch bewusst nicht angewendet, da die einzelnen KSSH bereits einen Kalman-Filter repräsentieren.

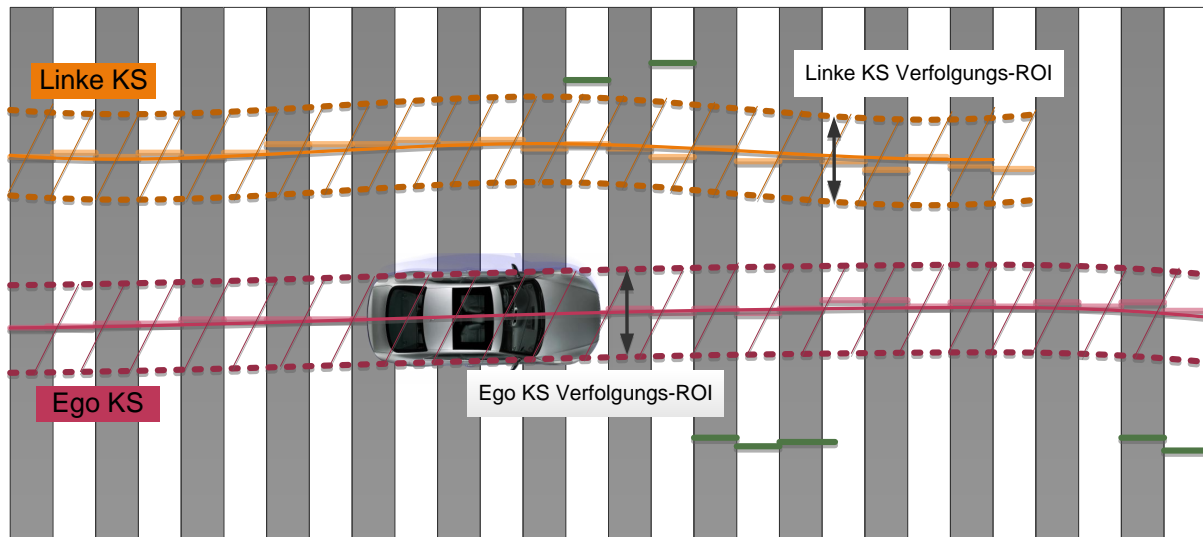


Abbildung 14.4: Verfolgung von bekannten Kolonnenspuren (KS)

14.3 Detektion von Kolonnenspurwechslern (KSW)

Für die Detektion von Spurwechslern existieren zahlreiche Ansätze in der Literatur. So konzentrierte sich zum Beispiel Dagli (2005) in seiner Dissertation auf die Erkennung von Einscher-Situationen für ein Abstandsregelsystem. Sein Modell der Einscher-Situation betrachtet Relativgrößen zwischen Fahrzeug und Fahrstreifen, die Ähnlichkeit der Trajektorie zu Norm-Spurwechseltrajektorien¹³⁶ und die Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit an die Geschwindigkeit der Ziel-Lücke im neuen Fahrstreifen.

Im Rahmen meiner Arbeit werden diese drei Merkmalsquellen aufgegriffen. In jedem Zeitschritt werden die einzelnen dynamischen Objekte mit den gebildeten Kolonnenspuren verknüpft. Hierzu werden sie über den euklidischen Abstand einer Kolonnenspur zugeordnet. Da ein Objekt durch das vorgelagerte Tracking eine relativ stabile Identifikationsnummer besitzt, kann eine Historie über die Zugehörigkeit zur KS aufgebaut werden. Ein Wechsel der Zugehörigkeit ist somit ein starkes Indiz für einen KSW. Die Trajektorie eines Fahrzeuges wurde ebenfalls auf die Ähnlichkeit mit SPW-Trajektorien untersucht, es zeigte sich allerdings, dass die Nutzung eines Ähnlichkeitsmaßes nicht zu einer Verbesserung der KSW-Klassifikation beiträgt. Auch ein weiteres Merkmal erwies sich im Stau

¹³⁶Zu Norm-Spurwechseltrajektorien siehe auch Freyer (2008)

bzw. in Einfädelsituationen nicht als nutzbringend: Der Vergleich der Geschwindigkeit eines potentiellen SPW mit der Geschwindigkeit der Zielkolonne am Einscherort. Diese Erkenntnis deckt sich mit Alltagserfahrungen. Im Stau und speziell bei der EFS migrieren durchaus langsamer fahrende Fahrzeuge von der wegfallenden in die schneller fließende, aufnehmende Kolonne. Aus diesem Grund bildet die Objektzuordnung zur KS und ein erkannter Wechsel einen einfachen Klassifikator. In 14.5 ist das Ergebnis einer solchen Klassifikation zu sehen. Aufgrund dessen, dass ein KSW die Kolonne erst wechseln muss, bevor er erkannt wird, wird dieser erst spät im Verlauf des Fahrstreifenwechsels erkannt.

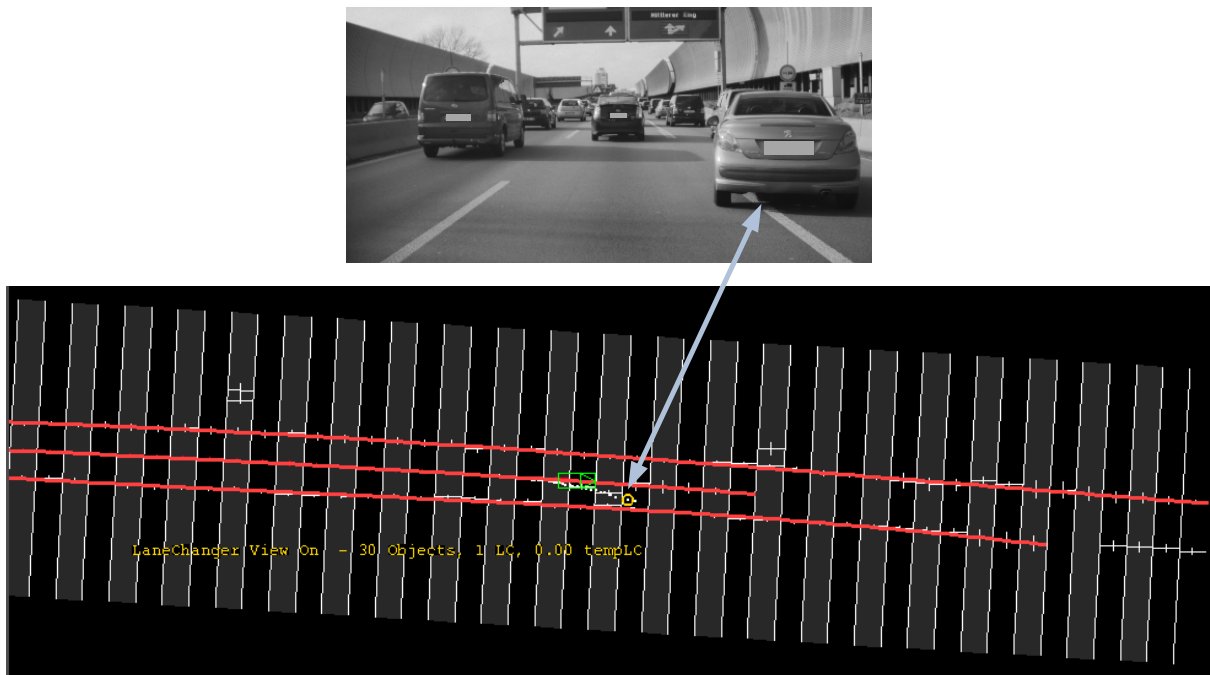


Abbildung 14.5: Positivklassifikation eines KSW - Hintergrund: Intervallkarte, Rot: Kolonnenspuren, Grüne Box: EGO, Weiße Punkte: Trajektorie des KSW, Gelber Kreis: Detektionsort des KSW. Das Videobild dient nur der Dokumentation.

15 Klassifikatordesign und Ergebnisse auf der Basis von Realdaten

Die theoretischen Überlegungen sollen anhand von Realdaten validiert werden. Zunächst wird die verwendete Datenbasis vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird auch das spezielle Markieren der Zielklassen erläutert. Anschließend dienen Analysen zum Vergleich des SBRF mit einem CART, zum Einfluss einer Übergewichtung der Klasse EFS auf das Training und zum Einfluss der Transitionsklasse ?EFS sowie die Merkmalsselektion dem schrittweisen Aufbau des Klassifikators bzw. dessen Trainingsumgebung. Zum Ende des Kapitels werden die Klassifikationsergebnisse vorgestellt und diskutiert.

15.1 Datenbasis und Vergabe von Label

Die für das Training bzw. das Testen benutzte Datenbasis wird in Tabelle 15.1 näher beschrieben. Es handelt sich dabei ausschließlich um Daten aus dem Realverkehr. Insgesamt stehen 4424 Samples aus Nicht-Einfädelsituationen (!EFS), 809 aus Einfädelsituationen (EFS) und 193 aus unsicheren Transitionsphasen (?EFS) zur Verfügung. Ein Großteil wurde auf Autobahnen aufgezeichnet, wobei die Ursache des Fahrstreifeneinzuges je zur Hälfte in Autobahnenenden und Baustellen liegen. In Abbildung 15.1 vermitteln Videobilder einen Eindruck der aufgezeichneten Realszenarien auf den Autobahnen A96 und A9 sowie auf dem Ingolstädter Stadtring. Mehrere Datensätze mit gleicher Domäne wurde durch mehrmaliges Durchfahren gewonnen.

Die beim Labeln eingeführten unsicheren Transitionphasen (?EFS) resultieren aus der Unschärfe der Situationsbeschreibung einer Einfädelsituation. In diesem Zusammenhang wurde bewusst darauf verzichtet, scharfe Kriterien wie den Abstand zur Engstelle, das Überfahren der Fahrstreifenmarkierung des vordersten Spurwechslers von der wegfallenden zur aufnehmenden Kolonne oder den Kolonnenspurwechsel des letzten Fahrzeuges vor dem EGO zu nutzen, da solche Referenzen erst a-posteriori definiert werden können und sich im laufenden Betrieb ggf. nach dem ersten Festsetzen nochmals ändern. Der Klassifikator soll aber in der Lage sein, eine EFS in Anlehnung an das Verständnis des Menschen zu detektieren. Aus diesem Grund haben mehrere Experten die Datenbasen gelabelt. Die

Nummer	Domäne	Ursache des Fahrstreifeneinzugs	Anzahl an Samples		
			!EFS	?EFS	EFS
1	Autobahn A96	Autobahnende	1201	26	257
2	Stadt	Baustelle	321	4	68
3	Autobahn A96	Autobahnende	388	56	25
4	Autobahn A9	Baustelle	149	44	120
5	Autobahn A9	Baustelle	576	13	97
6	Autobahn A96	Autobahnende	300	0	86
7	Autobahn A9	Baustelle	701	12	54
8	Autobahn A96	Autobahnende	788	38	102
Summe			4424	193	809

Tabelle 15.1: Übersicht zur Datenbasis



Abbildung 15.1: Videobilder zu den eingefahrenen Szenarien, Links: Ende der A96 in München, Mitte: A9 bei München, Rechts: Ingolstädter Stadtring

Phasen, in denen sie sich nicht einig waren, wurden als unsichere Transitionsphase ?EFS gekennzeichnet.

15.2 Vergleich CART und SBRF

Mit Hilfe eines einfachen Vergleichs des SBRF mit dem Standardverfahren Classification and Regression Tree (CART) sollen die Vorteile des SBRF gezeigt werden. Grundlage hierfür ist ein Training mit allen 20 Merkmalen (Vgl. Kapitel 13.6), wobei die unsicheren Transitionsphasen ?EFS ausgeklammert werden. Aus Vereinfachungsgründen lautet die verwendete Kostenfunktion

$$\mathcal{L}(\mathbf{y}, [g(\mathbf{x}[1]), \dots, g(\mathbf{x}[n_{\text{end}}])]) = \frac{1}{n_{\text{end}}} \sum_{n=1}^{n_{\text{end}}} \bar{\delta}(\mathbf{y}[n], \hat{\mathbf{y}}[n]), \quad (15.1)$$

mit $\hat{y}[n] = g(\mathbf{x}[n])$ und

$$\bar{\delta}(y[n], \hat{y}[n]) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } y[n] = \hat{y}[n] \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (15.2)$$

womit sich das angenäherte Risiko zu

$$\hat{R}(g) = \frac{1}{M'} \sum_{m=1}^{M'} \mathcal{L}(\mathbf{y}, [g(\mathbf{x}[1]), \dots, g(\mathbf{x}[n_{\text{end}}])]) \quad (15.3)$$

ergibt. Mit $M' = 1$ und acht vorliegenden Szenarien kann eine achtfache Kreuzvalidierung durchgeführt werden. Dabei werden jeweils sieben Szenarien trainiert, so dass auf dem verbleibenden Szenario getestet werden kann. Die in den Tabellen 15.2 und 15.3 gegebenen Ergebnisse stellen Durchschnitts-Prozentwerte bezüglich der acht Tests dar. Der SBRF zeigt einen Klassifikationsfehler von $\hat{R}(g) = 10,25\%$ ($8,02\% + 2,23\%$, Tab. 15.2) und führt die Klassifikation damit besser durch als der CART mit seinem Klassifikationsfehler von $\hat{R}(g) = 17,37\%$ ($9,91\% + 7,46\%$, Tab. 15.3). Zudem weist der CART eine höhere Falsch-Positiv Rate auf als der SBRF. Die Ergebnisse zeigen, dass das Ensemble-Lernverfahren SBRF besser für die Klassifikation der EFS geeignet ist als ein einzelner CART.

	$y = \text{EFS}$	$y = \text{!EFS}$
$\hat{y} = \text{EFS}$	8,63	2,23
$\hat{y} = \text{!EFS}$	8,02	81,12

Tabelle 15.2: Konfusionsmatrix des SBRF (20 Merkmale, 8-fache Kreuzvalidierung, Ausschluss der Klasse ?EFS für das Training)

	$y = \text{EFS}$	$y = \text{!EFS}$
$\hat{y} = \text{EFS}$	9,19	9,91
$\hat{y} = \text{!EFS}$	7,46	73,44

Tabelle 15.3: Konfusionsmatrix des CART (20 Merkmale, 8-fache Kreuzvalidierung, Ausschluss der Klasse ?EFS für das Training)

15.3 Einfluss eines Oversamplings der Klasse EFS

Die Einfädelsituation ist erfahrungsgemäß ein räumlich begrenztes Ereignis, das auf Langstrecken zudem relativ selten auftritt.¹³⁷ Das zeigt sich auch in den aufgenommenen Daten, bei denen die Anzahl an Samples der Klasse !EFS überwiegt.¹³⁸ Damit stellt sich die Frage, ob ein solch unbalancierter Trainingsatz die Qualität des Klassifikators beeinflusst. Die hierzu durchgeführte Untersuchung nutzt alle 20 Merkmale (Vgl. Kapitel 13.6), wobei die unsicheren Transitionsphasen ?EFS ausgeklammert werden. Der SBRF wird zehn Mal aufgestellt und mittels oob-Test evaluiert. Die in den Tabellen 15.4 bis 15.6 gegebenen Zahlenwerte stellen Durchschnittswerte dieser Tests dar.

Aus den Ergebnissen kann man ableiten, dass verschiedene Wichtungen der Klassen $EFS:!EFS=\{1:1, 1:9, 1:x\}$ keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamtklassifikationsfehler haben (Tab. 15.4). Allerdings zeigt sich eine leichte Verschiebung der Erkennungsraten in den Konfusionsmatrizen (Tab. 15.5 und 15.6): Mit einem ausgeglichenen Trainingsset $EFS:!EFS=(1:1)$ sinken die Falsch-Positiv Klassifikationen von 2,35% auf 0,79% verglichen mit der Wichtung $EFS:!EFS=(1:x)$. Ein Oversampling der Minoritätsklasse EFS führt zu einer niedrigeren Spezifität (0,400 für $EFS:!EFS=(1:1)$, 0,507 für $EFS:!EFS=(1:x)$), während sich die Sensitivität der Majoritätsklasse !EFS erhöht (0,972 für $EFS:!EFS=(1:1)$, 0,991 für $EFS:!EFS=(1:x)$). Aus Sicht einer Fahrerassistenzfunktion ist eine möglichst niedrige Falsch-Positiv Rate anzustreben. Daher werden für alle folgenden Untersuchungen die Daten der Klasse EFS übergewichtet.

EFS : !EFS		1:1	1:9	1:x
Durchschn. Klassifikationsfehler	$\hat{R}(g)$ [%]	10,78	10,14	10,56
min .. max Klassifikationsfehler	$\hat{R}(g)$ [%]	9,9 .. 11,9	9,4 .. 11,6	9,2 .. 11,6

Tabelle 15.4: oob-Erwartungswert für Verschiedene $EFS:!EFS$ Wichtungen (20 Merkmale, 10 Iterationen, Ausschluss der Klasse ?EFS)

	y = EFS	y = !EFS
$\hat{y} = EFS$	8,44	2,35
$\hat{y} = !EFS$	8,21	81,00

Tabelle 15.5: Konfusionsmatrix für die Wichtung $EFS:!EFS=(1:x)$ (20 Merkmale, 10 Iterationen, Ausschluss der Klasse ?EFS)

¹³⁷Genau genommen ist es in Anlehnung an das Wort „kurzzeitig“ ein kurz-streckiges Ereignis. Der Bezug *Zeit* verliert im Stau und vor allem im Stillstand an Bedeutung, während der *räumliche Bezug* weiterhin gegeben ist.

¹³⁸ $N_{EFS} = 4424$, $N_{?EFS} = 193$, $N_{EFS} = 809$, siehe Kapitel 15.1

	$y = \text{EFS}$	$y = \text{!EFS}$
$\hat{y} = \text{EFS}$	6,66	0,79
$\hat{y} = \text{!EFS}$	9,99	82,56

Tabelle 15.6: Konfusionsmatrix für die Wichtung EFS:!EFS=(1:1) (20 Merkmale, 10 Iterationen, Ausschluss der Klasse ?EFS)

15.4 Einfluss der Transitionsklasse ?EFS

Die Transitionsklasse ?EFS bildet eine Übergangsklasse zwischen EFS und !EFS, um die Teile einer Situation zu labeln, die von verschiedenen Experten uneinheitlich bewertet werden. Alle bisher gegebenen Ergebnisse schlossen Daten aus dieser Klasse aus. Eine erste Untersuchung ergab, dass die Klassifikatoren, denen sämtliche Informationen aus ?EFS im Training vorenthalten werden, im Test alle ?EFS als !EFS klassifizieren. Aus diesem Grund stellt sich an dieser Stelle die Frage, wie das Ergebnis durch die Hinzunahme von ?EFS Daten zum Training beeinflusst wird. In Tabelle 15.7 ist die Konfusionsmatrix bei Einschluss der ?EFS Daten ersichtlich. Eine erhoffte Verbesserung der Richtig-Positiv Klassifikationen kann nicht erreicht werden. Vielmehr steigt der Klassifikationsfehler von 10,78% (Tabelle 15.6) auf 14,75%, wobei sich vor allem die Falsch Positiv Rate von 0,79% (Tab. 15.6) auf 3,50% erhöht. Aus diesem Grund werden für die weiteren Untersuchungen Daten der Transitionsklasse ?EFS für das Training ausgeschlossen.

	$y = \text{EFS}$	$y = \text{!EFS}$
$\hat{y} = \text{EFS}$	8,69	3,50
$\hat{y} = \text{!EFS}$	11,45	76,35

Tabelle 15.7: Konfusionsmatrix nach dem Training unter Einschluss der ?EFS Daten (20 Merkmale, 5 Iterationen, oob Schätzung)

15.5 Merkmalsselektion

Die Merkmalsselektion (MS) zielt auf die Bestimmung eines minimalen Sets an Merkmalen, mit dem eine hinreichend genaue Klassifikation noch möglich ist. Sie ist damit ein wertvolles Werkzeug für das Klassifikatordesign und auch für das Verständnis der Klassifikationsaufgabe. So kann ein Experte die MS nutzen, um die von ihm erdachten Merkmale auf Gültigkeit und Nutzen zu untersuchen. Die Kostenfunktion \mathcal{L} definiert hierbei das Optimierungskriterium, wobei dieses funktionspezifisch aufgeprägt werden kann. Als Abbruchkriterium für die Merkmalsselektion dient zum einen der Klassifikationsfehler $\hat{R}(g)$, wenn dieser einen Wert von 0,15 überschreitet, und zum anderen die relative

Wichtigkeit der Merkmale untereinander, wenn diese einen Wert größer als 0,02 für alle Merkmale annimmt. In Abbildung 15.5 ist die relative Wichtigkeit der Merkmale zu Beginn der Merkmalsselektion dargestellt. Bereits hier ist eine herausragende Bedeutung des Merkmals *SumOfDeltaYInIntervals* zu erkennen.

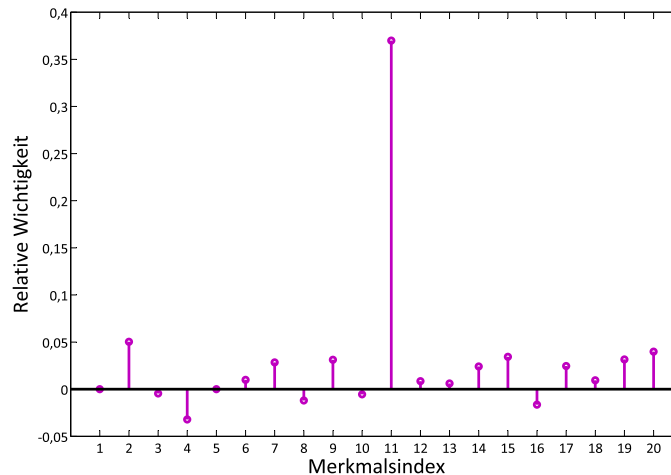


Abbildung 15.2: Relative Wichtigkeit der einzelnen Merkmale zu Beginn der Merkmalsselektion

Die Entwicklung des Klassifikationsfehlers $\hat{R}(g)$ über den Verlauf der Merkmalsselektion wird in Abbildung 15.3 gezeigt. Hierbei zeigt sich ein Trend zur positiven Entwicklung des Klassifikationsfehlers bis nach der schrittweisen Selektion nur noch vier Merkmale verbleiben. Danach steigt der Fehler wieder an, was dafür spricht, dass ein sehr einfacher Schwellwertklassifikator auf Basis eines einzelnen Merkmals keine zufriedenstellende Lösung bietet.

Um das finale Set an Merkmalen zu bestimmen, wird die MS zehn Mal durchgeführt. Die Notwendigkeit für die Wiederholungen liegt im Algorithmus zum Aufbau des SBRF: Die eingebundenen Zufallsprozesse, die dazu führen, dass die einzelnen Bäume des Waldes unterschiedlich ausgeprägt werden, führen zu ähnlichen, aber nicht identischen Ergebnissen. Die in Tabelle 15.8 zusammengefassten Endergebnisse spiegeln diese Zufallsprozesse wider. Während der Mix an Merkmalen differiert, bewegt sich der Klassifikationsfehler auf der Basis der geschrumpften Merkmalsräume in einer kleinen Spanne zwischen 8,31% und 9,72%. Bei den Merkmalszusammenstellungen fällt auf, dass in jedem Set das wichtigste Merkmal *SumOfDeltaYInIntervals* vorkommt. Weiterhin zeigt sich bei den nur aus zwei Merkmalen bestehenden Sets ein eindeutiger Trend für das Begleitmerkmal *DistanceToCTIntersection* (Iterationen 3, 6, 7 und 10). Da diese Kombination auch den niedrigsten Klassifikationsfehler ausweist, wird dieser stark vereinfachte Merkmalsraum im Folgenden für die Ergebnispräsentation genutzt.

Iteration	Merkmale	Durchschnittlicher Klassifikationsfehler $\hat{R}(g)$ [%]
#1	SumOfDeltaYInIntervals MeanAcceleration DynNoOfRadarReflexesLeft ROI	8,81
#2	SumOfDeltaYInIntervals MeanAcceleration DynNoOfRadarReflexesLeft ROI DensityOfHypothesisFusionAheadEgo	8,65
#3	SumOfDeltaYInIntervals DistanceToCTIntersection	9,01
#4	SumOfDeltaYInIntervals StaticDistributionRadarReflexesROI	8,49
#5	SumOfDeltaYInIntervals MeanAcceleration DynNoOfRadarReflexesLeft ROI DensityOfHypothesisFusionAheadEgo	9,29
#6	SumOfDeltaYInIntervals DistanceToCTIntersection	8,31
#7	SumOfDeltaYInIntervals DistanceToCTIntersection	9,11
#8	SumOfDeltaYInIntervals MeanAcceleration DynNoOfRadarReflexesLeft ROI	8,54
#9	SumOfDeltaYInIntervals MeanAcceleration DynNoOfRadarReflexesLeft ROI	8,39
#10	SumOfDeltaYInIntervals DistanceToCTIntersection	9,72

Tabelle 15.8: Ergebnisse von zehn Durchgängen der Merkmalsselektion

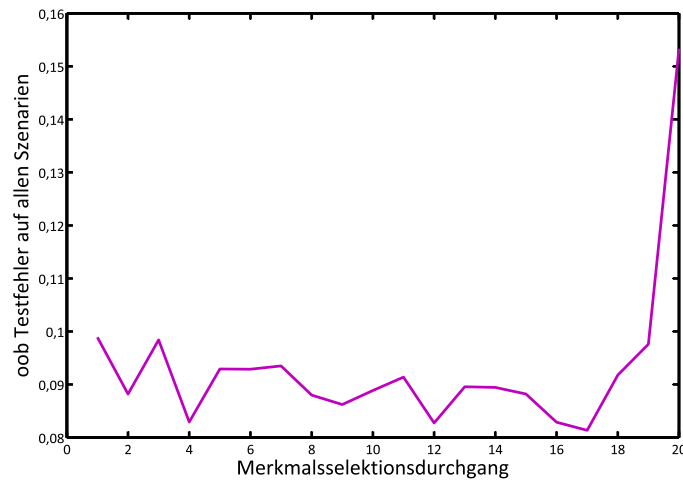


Abbildung 15.3: Klassifikationsfehler $\hat{R}(g)$ bei zunehmender Merkmalsselektion

15.6 Klassifikationsergebnisse

Unter Berücksichtigung aller bisher getroffenen Entscheidungen über die Auswahl des Klassifikators (pro SBRF), die Übergewichtung der Klasse EFS sowie den Ausschluss der Klasse ?EFS für das Training und die Verwendung eines Merkmalsvektors, bestehend aus lediglich zwei Merkmalen (SumOfDeltaYInIntervals, DistanceToCTIntersection), ergibt sich für die Klassifikation im oob Test ein Klassifikationsfehler von 8,31%. Damit konnte das ursprüngliche Ergebnis von 10,56% (Tab. 15.5) durch Übergewichtung und MS leicht verbessert werden. In Abbildung 15.4 ist beispielhaft das Ergebnis eines Szenarios dargestellt, wobei das Videobild den Zeitpunkt der ersten Richtig-Positiv Klassifikation zeigt. Aus diesem ist das Potential der EFS-Klassifikation ersichtlich: Ohne dass das eingefärbte Fahrzeug bereits die Markierungslinie überfahren hat, kann seine Einscherintention durch die EFS Klassifikation bereits eindeutig bestimmt werden. Eine komfortorientierte FAS zur Längsregelung kann sich in dieser speziellen Situation entsprechend kooperativ zeigen, wohingegen sie in anderen Fällen dem bekannten Phänomen des „Durchreichens“ entgegenwirken kann.

Das Ergebnis aus der Abbildung 15.5 zeigt die Verallgemeinerungsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens. Das Szenario spielt sich an einem Autobahnende mit vorheriger Abfahrt ab. Es handelt sich um einen Ausnahmefall: Kein anderes Szenario aus dem gesamten Datenset wurde an dieser Stelle aufgenommen. Auch wenn die erste Richtig-Positiv Klassifikation im fließenden Verkehr erst 5 Sekunden vor dem Passieren der Engstelle auftritt, so beruht sie auf dem Training von Daten anderer Örtlichkeiten und zeigt die Verallgemeinbarkeit des Ansatzes.

Ein großes Verbesserungspotential für weiterführende Arbeiten zeigen die Ergebnisse auf

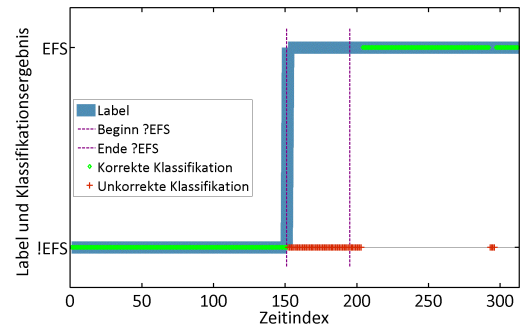


Abbildung 15.4: Klassifikationsergebnis zum Datensatz Nr. 5; Links: Dokumentationsvideobild zum Zeitpunkt der ersten Richtig Positiv Klassifikation. Das eingefärbte Auto schert kurz danach ein. Rechts: Verlauf der Klassifikation

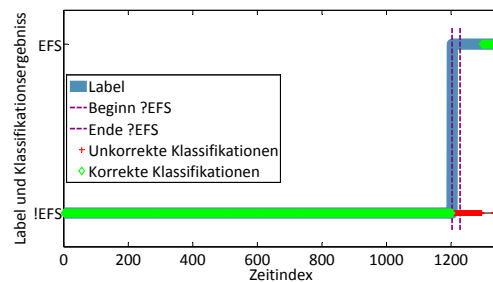


Abbildung 15.5: Klassifikationsergebnis zum Datensatz Nr. 1; Links: Dokumentationsvideobild zum Zeitpunkt der ersten Richtig Positiv Klassifikation, Rechts: Verlauf der Klassifikation

den Daten zwei weiterer Szenarien: Bei diesen erfolgte keine Richtig-Positive Klassifikation. Bei beiden Szenarien konnte in der Merkmalsgenerierung die EGO-Kolonnenspur nicht richtig ausgebildet werden. Einmal führten zahlreiche Spurwechsler direkt vor dem EGO zu einer Verzerrung der EGO-KS. Bei dem anderen Szenario zog ein langer LKW vor dem EGO alle Radar-Reflexe auf sich. Die Ergebnisse aus diesen beiden Datensätzen zeigen zum einen die Wichtigkeit der Merkmale aus den Kolonnenspuren und erklären zum anderen die Fehlklassifikationsraten (= Falsch-Negativ) in den gezeigten Konfusionsmatrizen.

15.7 Diskussion der Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass sich das erarbeitete Konzept zur Erkennung einer Einfädelsituation auf Realdaten eignet. Die Höhe des Klassifikationsfehlers von 8,31% ist für den hier vorgestellten Konzeptumfang akzeptabel. Im Vergleich zu anderen Arbeiten zur Situationsklassifikation kann dieser Wert sogar als sehr gut befunden werden.¹³⁹ Da darauf geachtet wurde, dass der Falschklassifikationsanteil (Falsch-Positiv) möglichst gering ausfällt, ist im laufenden Betrieb auch nicht mit unplausiblen und damit akzeptanzminderndem Fahrverhalten zu rechnen. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch den großen Einfluss der Merkmalsgenerierung auf das Endergebnis: Liefert das vorgeschaltete Modul zur Kolonnenspurerkennung falsche Daten, so kann auch ein sehr guter Klassifikator daraus nichts ableiten. Eine Verbesserung der Datenvorverarbeitung kann den im Wesentlichen aus Fehlklassifikationen bestehenden Klassifikationsfehler noch signifikant senken.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich der SBRF als Klassifikationsmethodik in der Situationsanalyse eignet. Aus den in Kapitel 12.3 aufgelisteten Vorteilen konnte die Verallgemeinerungsfähigkeit zur Klassifikation unbekannter Daten validiert werden. Des Weiteren ist die Möglichkeit des oob Tests gerade für Situationsklassifikationen sinnvoll, bei denen Daten schwer oder nur sehr aufwendig gewonnen werden können. Bei diesem Verfahren können die gleichen Datensätze sowohl für das Training als auch das Testing genutzt werden.

Das Gesamtergebnis entstand durch die Nutzung einer ganzen Reihe von Einzelanalysen, deren Mehrwert ebenfalls dargestellt werden konnte. So wurde zunächst die Trainingsumgebung sukzessiv verbessert, um sich die Möglichkeit des oob-Tests zu Nutze zu machen und eine Merkmalsselektion durchzuführen. Der nach der Selektion radikal reduzierte Merkmalsraum führte nicht nur zu marginal verbesserten Ergebnissen, sondern vereinfachte auch die notwendige Merkmalsvorverarbeitung. Insgesamt konnte dadurch der Nutzen der in Abbildung 12.5 aufgezeigten Vorgehensweise belegt werden.

¹³⁹37% bei Freyer (2008) für die Klassifikation zur Spurwechselunterstützung, 26,5% bei Dagli (2005) für die Klassifikation von Einscherer-Situationen

Teil V

Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der Literatur zum Themengebiet der Situationsanalyse (SiA) für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (FAS) hat gezeigt, dass zwar in großem Umfang unterschiedliche Problemstellungen unter dem Namen der Situationsanalyse angegangen wurden, dass es aber an einer gesamtheitlichen Darstellung und Strukturierung all der Teilaufgaben innerhalb der SiA fehlt. In dieser Dissertation wurde diese Lücke durch die Definition von neun Teilaufgaben und deren funktionaler Struktur geschlossen. Gleichzeitig wurde die SiA als Teil des Entwicklungsprozesses beschrieben, so dass diese nicht mehr nur als Modul, sondern auch als Prozess betrachtet wird.

Die theoretischen Überlegungen wurden im dritten Teil dieser Dissertation auf die Problemstellung der Situationsanalyse für eine sicherheitsorientierte FAS angewandt. Hierbei hat die SiA die Aufgabe, die Notwendigkeit eines aktiven Eingriffes zu begründen. Obwohl es zahlreiche Vorarbeiten auf dem Gebiet der SiA für eine aktive Gefahrenbremsung gibt, konnte keine gefunden werden, die sowohl beliebig strukturierte statische Hindernisse als auch dynamische Verkehrsteilnehmer beachtet, die zudem deren Interaktionsbeziehungen berücksichtigt, die die Aufmerksamkeit des Fahrers einflechtet und die im Versuchsträger auf der Basis von Realdaten echtzeitfähig funktioniert. Der zweite Beitrag zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn ist daher der hier vorgestellte *CoBRA*-Algorithmus, der diesen Erwartungen gerecht wird. Neben dem Algorithmus als solchen liegt der Wert der Arbeit auch in der Modellierung des Grenzverhaltens eines aufmerksamen Fahrers bei Fahrten durch Engstellen. Auf der Basis einer eigenen Studie zur akzeptierten minimalen Breite bei Tordurchfahrten konnte das Modell konkretisiert werden.

In ihrer statischen Version wurde die Situationsanalyse für die aktive Gefahrenbremsung bei zahlreichen Präsentationen, wie zum Beispiel der Abschlussveranstaltung zum Förderprojekt AKTIV vom 23. bis 25. Juni 2010, erfolgreich vorgeführt. In dieser Dissertation wurden beispielhaft vier Szenarien auf Realdaten für eine Ergebnisdarstellung herausgegriffen, anhand derer auch die Vorteile der dynamischen Erweiterungen zum Tragen kommen.

Der vierte Teil der Dissertation widmet sich der Situationsanalyse für eine Komfortfunktion und beschränkt sich dabei auf das Teilproblem der Erkennung einer Einfädelsituation aus der Sicht eines beteiligten Fahrzeuges. Obwohl eine Anpassung des Kooperationsverhaltens in solchen Situationen aus Sicht einer automatischen Längsführung nicht nur komfort- und sicherheitssteigernd wäre, sondern eine geänderte Handlungsweise auch vom Gesetzgeber gefordert wird, konnte selbst mit einer ausgedehnten Suche nach Publikationen kein entsprechender Klassifikationsalgorithmus gefunden werden.

Für die Klassifikationsaufgabe wurde das im Bereich der Situationsanalyse für FAS noch unbekannte Ensemblelernverfahren *Scenario Based Random Forest* (SBRF) aufgegriffen. Es konnte gezeigt werden, dass die spezifischen Vorteile dieses Verfahrens auch der Situationsanalyse zu Gute kommen. Des Weiteren wurde ein strukturiertes Vorgehen zum Design sowohl des Trainingsprozesses als auch des Klassifikators beschrieben. Die Ergebnisse zeigen eine erste richtig-positiv Klassifikation, noch bevor das nahe einscherende Nachbar-

fahrzeug die Spurmarkierung überschreitet. Damit ist es jedem anderen bekannten Verfahren voraus. Die dargestellten Resultate beruhen auf der Auswertung von Realdaten und nutzen lediglich die aus der Serienproduktion bekannte Sensorik. Das Klassifikationsergebnis mit einem Fehler von 8,31% kann im Vergleich mit anderen Situationsklassifikatoren als gut bewertet werden.

Für die Klassifikation ist die Qualität der Merkmale entscheidend. Die Einfädelsituationserkennung nutzt Merkmale aus einer spezifischen Merkmalsvorverarbeitung, die ebenfalls im Rahmen dieser Dissertation entstanden ist. Hier schlummert das wesentliche Potential für eine Verbesserung des Systems.

Mit Blick auf die Zukunft gewinnt die Erkennung spezifischer Teil-Situationen weiter an Bedeutung. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob nicht auch *Nicht-Situationen* oder *Normal-Situationen* modelliert werden können, um die Analyseergebnisse im Nachgang zu plausibilisieren. Gerade für sicherheitskritische Anwendungen könnten damit die diametralen Ziele Nutzenerhöhung und Reduktion von Fehlauslösungen gleichzeitig bedient werden. Des Weiteren hat sich bei der Arbeit die Analyse der Beziehungen zwischen Fahrzeugen und deren Einfluss auf das weitere Verkehrsgeschehen als potentieller Inhalt weiterer Forschungsleistungen herausgestellt. Im viertel Teil werden erste, einfache Beziehungen für die Bildung von Interaktionsgruppen verwendet. Auf dieser Basis ist es vorstellbar, detailliertere Modelle zur Interaktion abzuleiten, die auch die (gegenseitige) Steuerbarkeit sowie die Güte der Vorhersagbarkeit des Handelns Dritter beinhalten.

Anhang

A Versuchsfahrzeuge

Das für die aktive Gefahrenbremsung verwendete Versuchsfahrzeug ist in Abbildung A.1 zu sehen. Hierbei handelt es sich um einen AUDI Q7, der zusätzlich um folgende Elemente erweitert wurde:

- ein Monovideo-Kamerasystem
- ein Vorentwicklungs-Lasersensor
- ein Doppel Long Range Radar System (LRR3)
- eine Innenraumkamera
- ein aktiver Bremsbooster zur Ansteuerung von Vollverzögerungen (Serienhardware mit modifizierter Steuergerätesoftware)
- Rechnerhardware (Windows-System)
- Energiespeicher und Spannungsversorgung
- eine Erweiterung der Vernetzung

Der Sensorträger für die Datenaufzeichnung in Einfädelsituationen ist nach den gleichen Grundsätzen aufgebaut: Die zusätzliche Sensorik wird möglichst unauffällig in die bestehende Serienhülle des Fahrzeuges integriert (Abb. A.1, oben). Im Kofferraum befindet sich die Auswertungshardware (Abb. A.1, mittig unten), bei der meist ein ADTF¹⁴⁰ basiertes System auf Windows Basis zum Einsatz kommt. Vernetzt sind sowohl die neuen als auch die Serienelemente über CAN sowie FlexRay (Abb. A.1, links unten).

¹⁴⁰ADTF - Automotive Data and Time Triggered Framework, ein von der AUDI AG entwickeltes und mittlerweile zum Standard in der Automobilindustrie gereiftes Entwicklungswerkzeug für das Rapid Prototyping von FAS

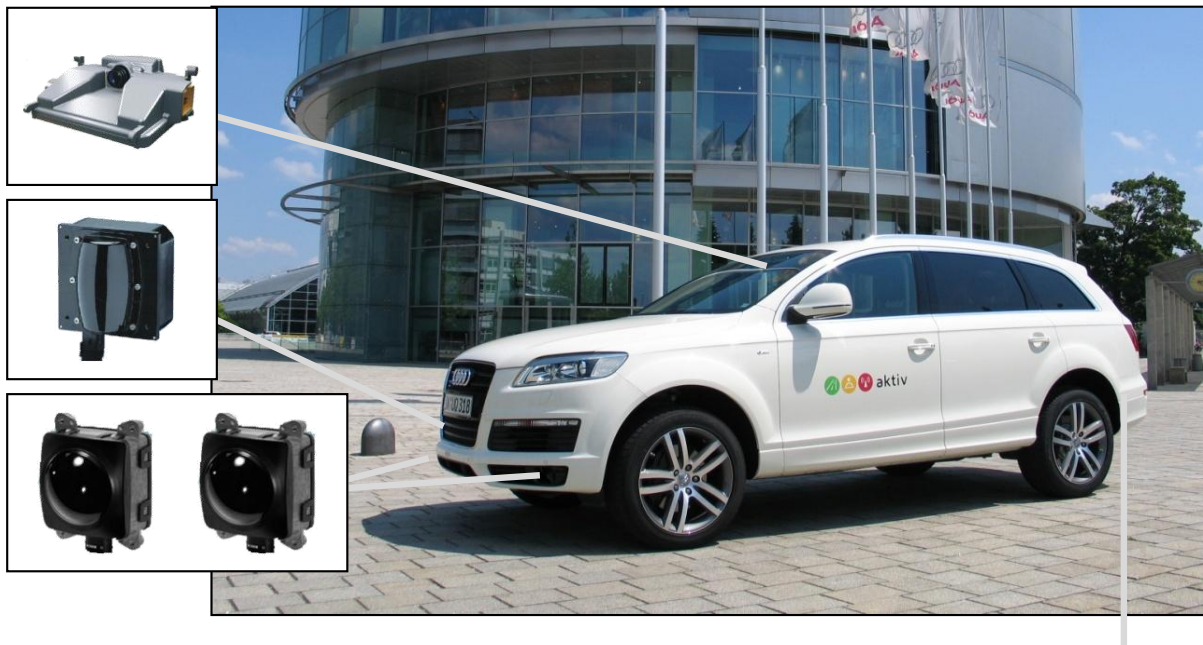
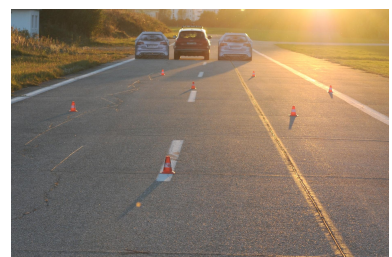
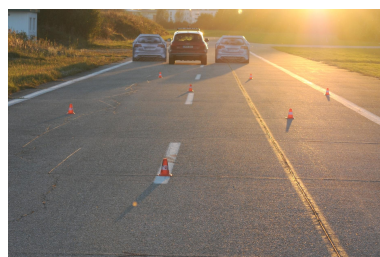
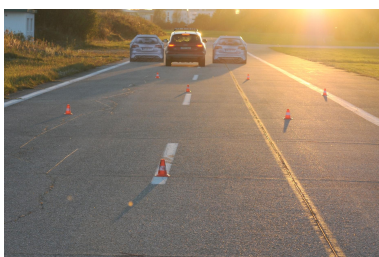
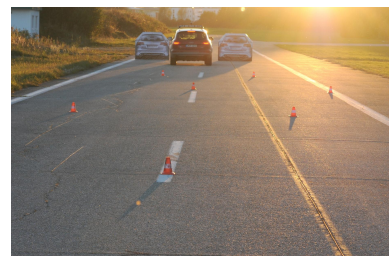
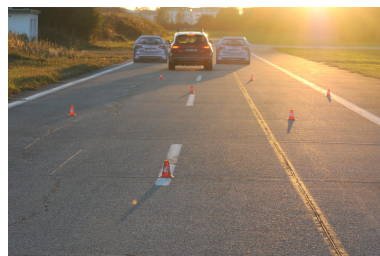
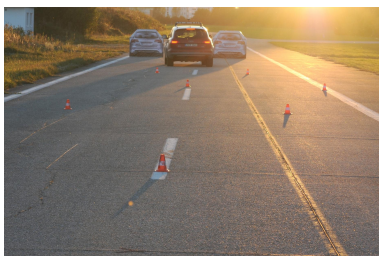
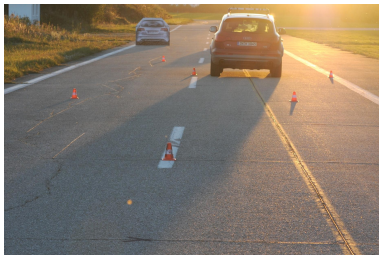


Abbildung A.1: Versuchsfahrzeug für die aktive Gefahrenbremsung, Oben: Verbau der Sensorik, Unten: Verbau zusätzlicher Hardware im Kofferraum

B Bilderreihe der Tordurchfahrt



C Dynamische Bewegungsmodelle

Innerhalb der Konzeptionsphase des *CoBRA*-Algorithmus wurden zwei Ansätze zur Modellierung der Dynamik miteinander verglichen: ein gekrümmtes Bahnmodell (CMM - Curvilinear Motion Model) und ein einfacheres, lineares Modell (LMM - Linear Motion Model).¹⁴¹ Ersteres wird mit den Gleichungen 6.11 bis 6.14 auf der Seite 78 beschrieben, die zum besseren Verständnis an dieser Stelle wiederholt werden:

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos \varphi(t) \quad (\text{C.1})$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin \varphi(t) \quad (\text{C.2})$$

$$\dot{v}(t) = a^t(t) \quad (\text{C.3})$$

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{a^n(t)}{v(t)}. \quad (\text{C.4})$$

Das lineare Modell hingegen ergibt sich über die Gleichungen

$$\dot{x}(t) = \frac{x(t)}{t} \quad (\text{C.5})$$

$$\dot{y}(t) = \frac{y(t)}{t} \quad (\text{C.6})$$

$$\dot{v}^x(t) = a^x(t) \quad (\text{C.7})$$

$$\dot{v}^y(t) = a^y(t). \quad (\text{C.8})$$

In der Abbildung C.1 sind die jeweiligen Koordinatensysteme der einzelnen Modellierungen ausgeführt. Während das LMM sich auf das Koordinatensystem im Ursprung und auf dessen einmal fixierte Ausrichtung bezieht, liegt der Bezugspunkt des CMM im Fahrzeug selbst und rotiert mit diesem. Für den praktischen Gebrauch müssen daher die Gleichungen des linearen Modells erweitert werden:

¹⁴¹Für eine Übersicht über mögliche Modellierungsformen siehe Rong Li (2002)

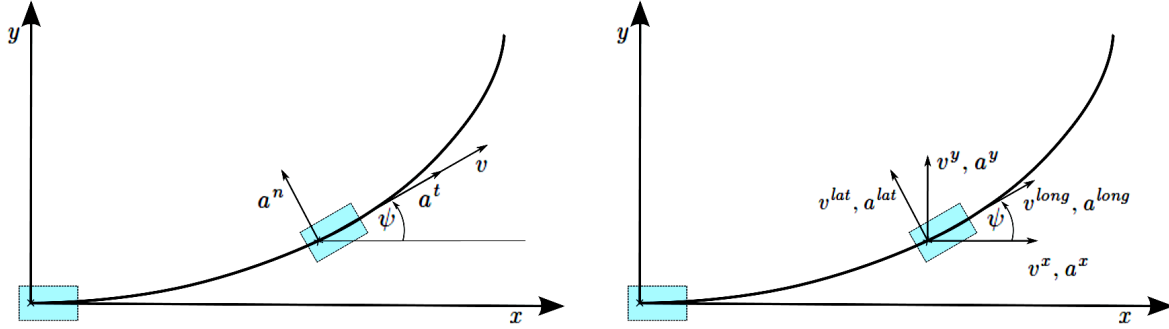


Abbildung C.1: Vergleich der Bewegungsmodellierungen, Links: Gekrümmtes Bahnmodell, Rechts: Lineares Modell

$$\tan \psi(t) = \frac{x(t)}{y(t)} \quad (\text{C.9})$$

$$a^x(t) = \cos \psi(t) a^{long}(t) - \sin \psi(t) a^{lat}(t) \quad (\text{C.10})$$

$$a^y(t) = \sin \psi(t) a^{long}(t) + \cos \psi(t) a^{lat}(t). \quad (\text{C.11})$$

Für einen Vergleich der beiden Modelle werden diese zunächst diskretisiert. Berechnet man danach die sich ergebenden Bahnen aus den beiden Modellen mit den Annahmen, dass das Fahrzeug zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ im Koordinatenursprung mit einer Ausrichtung $\psi_0 = 0$ und einer Geschwindigkeit $v_0 = 27,78 \frac{m}{s}$ startet und dass es weiterhin an der Haftgrenze lateral beschleunigt $a^{max} = 10 \frac{m}{s^2}$ und longitudinal nicht verzögert wird, dann erhält man die Ergebnisse aus Abbildung C.2. Während beide Bahnen sich erwartungsgemäß nach links krümmen, zeigen sie einen Unterschied im Verlauf der Krümmung. Am deutlichsten wird der Unterschied an dem Punkt, an dem die Berechnungen aufgrund des Erreichens des maximalen Gierwinkels von $\psi = \psi_{max} = 90^\circ$ abgebrochen wurden: Das CMM erreicht diese Beschränkung bereits bei Punkt $(X, Y)_{CMM} = (72.00, 69.71)$ und damit auf der X-Achse sechs Meter früher als das LMM mit $(X, Y)_{LMM} = (78.00, 69.96)$.

Ohne eine weitere Referenz zu Hilfe zu nehmen und unter Beachtung des Anspruches, bei der Situationsanalyse für die aktive Gefahrenbremsung Fehlauflösungen zu vermeiden, wurde aus diesem Grund dem gekrümmten Bahnmodell für den *CoBRA*-Algorithmus der Vorzug gegeben.¹⁴²

¹⁴²Für eine ausführliche Diskussion der Bewegungsmodelle siehe auch die von mir betreute Arbeit von Fischer (2010)

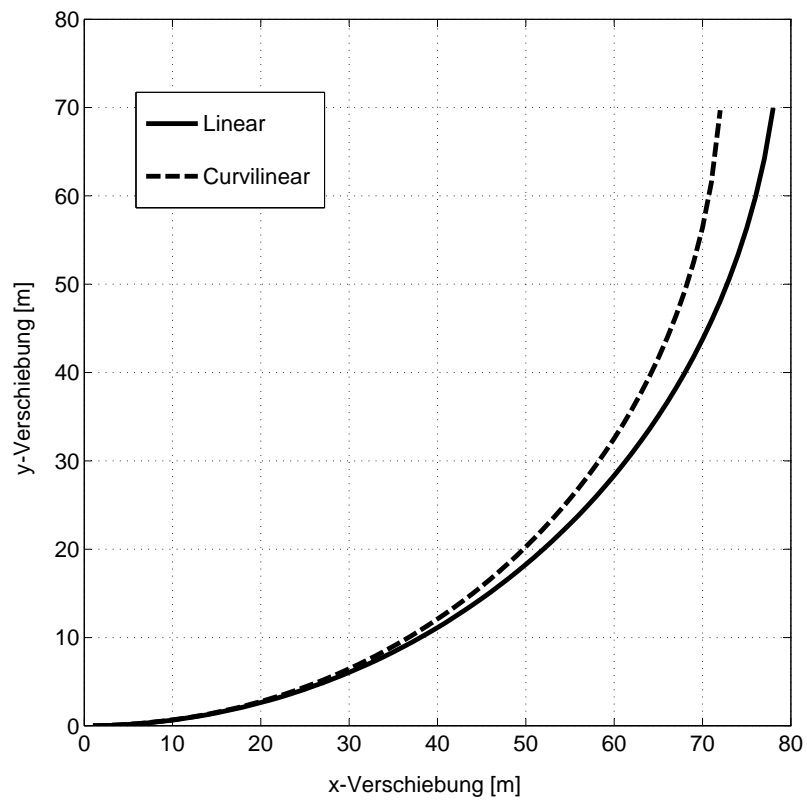


Abbildung C.2: Vergleich der Trajektorien der dynamischen Modelle ($v = 27,78m/s^2$, $a^t = 0m/s^2$, $a^n = 10m/s^2$)

D Komprimierung der Schnittmengenbildung des *CoBRA*-Algorithmus

Für die Logik der Schnittmengenbildung kann ein komprimiertes Set an Regeln verwendet werden, das sich aus den Regeln aller möglichen Permutationen ableiten lässt. Zum besseren Verständnis der im Folgenden beschriebenen Komprimierung sind in Abbildung D.1 alle relevanten Y-Positionen dargestellt:

L-LFK beschreibt für die linke Grenze des sich trompetenförmig öffnenden Raumes, in dem sich das Fahrzeug bewegen kann, die linke Fahrzeugkante. Man lese: **Linke Erreichbarkeitsgrenze, Linke FahrzeugKante**

L-RFK beschreibt für die linke Grenze des sich trompetenförmig öffnenden Raumes, in dem sich das Fahrzeug bewegen kann, die rechte Fahrzeugkante. Man lese: **Linke Erreichbarkeitsgrenze, Rechte FahrzeugKante**

R-LFK Rechte Erreichbarkeitsgrenze, **Linke FahrzeugKante**

R-RFK Rechte Erreichbarkeitsgrenze, **Rechte FahrzeugKante**

LBB Linke Grenze des **BelegtBereiches**

RBB Rechte Grenze des **BelegtBereiches**

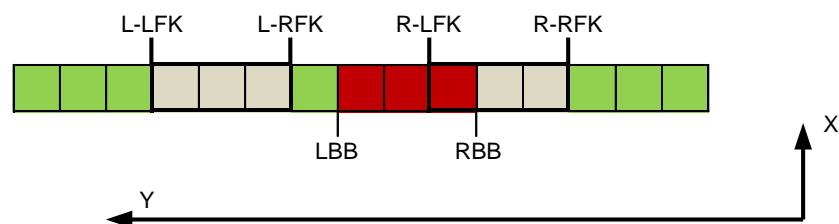


Abbildung D.1: Lagepositionen für die Schnittmengenbildung des *CoBRA*-Algorithmus

Stellt man nun eine Tabelle aller möglichen Konstellationen des Belegtbereiches in Relation zu den Erreichbarkeitsgrenzen auf, so erhält man das in Abbildung D.2 gezeigte

Set von 38 Möglichkeiten (Fällen). Als Entscheidungskriterien können Vergleiche der Lage der Erreichbarkeitsgrenzen mit der der Belegtbereichsgrenzen herangezogen werden. Im rechten Teil der Abbildung sind die entsprechenden Vergleiche mit X gekennzeichnet, die WAHR sein müssen, um einen Fall zuordnen zu können.

Nr.	Lage der Hindernisse relativ zum Fahrzeug	Logik zur Bestimmung des Einzelfalles															
		Linke Grenze Belegt Bereich LBB								Rechte Grenze Belegt Bereich LBB							
		> L-LFK	≤ L-LFK	> L-RFK	≤ L-RFK	> R-LFK	≤ R-LFK	> R-RFK	≤ R-RFK	> L-LFK	≤ L-LFK	> L-RFK	≤ L-RFK	> R-LFK	≤ R-LFK	> R-RFK	≤ R-RFK
1		x								x							
2		x								x							
3		x									x	x					
4		x									x	x					
5		x											x	x			
6		x											x	x			
7		x													x	x	
8		x													x	x	
9		x															x
10			x									x					
11			x									x					
12			x	x									x	x			
13			x	x									x	x			
14			x	x											x	x	
15			x	x											x	x	
16			x	x													x
17			x									x					
18			x	x									x	x			
19			x	x									x	x			
20			x	x											x	x	
21			x	x											x	x	
22			x	x													x
23					x									x			
24					x									x			
25					x	x									x	x	
26					x	x									x	x	
27					x	x											x
28					x									x			
29					x	x									x	x	
30					x	x									x	x	
31					x	x											x
32						x										x	
33						x										x	
34						x	x										x
35						x										x	
36						x	x										x
37								x									x
38								x									x

Abbildung D.2: Permutation aller Lagebeziehungen zwischen den Erreichbarkeits- und Belegtbereichsgrenzen

Man kann am Beispiel der ersten beiden Fälle erkennen, dass es sich um eine eindeutige, aber nicht eineindeutige Zuordnung handelt: Jedem Fall kann eindeutig ein beschreibendes

Set an wahren Vergleichen zugeordnet werden; einem solchen Set können aber mehrere Permutationsfälle zugewiesen werden. Diesen Umstand kann man sich zu Nutze machen, um die Fälle zusammenzufassen, die ein und dasselbe Vergleichsset besitzen. In Abbildung D.3 sind dieselben Permutationen nach der rechten Logiktablette sortiert. Grau bzw. weiß unterlegt sind hierbei jeweils die Fälle, deren Vergleichsset identisch ist. Die reduzierten 18 Fälle stellen die Basis des komprimierten Regelsets in Abbildung 8.5 auf Seite 104 dar.

Nr.		Lage der Hindernisse relativ zum Fahrzeug		Logik zur Bestimmung des Einzelfalles															
		Linke Grenze Belegt Bereich LBB								Rechte Grenze Belegt Bereich LBB									
		> L-LFK	<= L-LFK	> L-RFK	<= L-RFK	> R-LFK	<= R-LFK	> R-RFK	<= R-RFK	> L-LFK	<= L-LFK	> L-RFK	<= L-RFK	> R-LFK	<= R-LFK	> R-RFK	<= R-RFK		
1		X								X									
2		X								X									
3		X									X	X							
4		X									X	X							
5		X											X	X					
6		X											X	X					
7		X														X	X		
8		X														X	X		
9		X																	X
12			X	X									X	X					
13			X	X									X	X					
18			X	X									X	X					
19			X	X									X	X					
14			X	X												X	X		
15			X	X												X	X		
20			X	X												X	X		
21			X	X												X	X		
16			X	X															X
22			X	X															X
10			X									X							
11			X									X							
17			X									X							
25				X	X											X	X		
26				X	X											X	X		
29				X	X											X	X		
30				X	X											X	X		
27				X	X														X
31				X	X														X
23				X										X					
24				X										X					
28				X										X					
32						X											X		
33						X											X		
35						X											X		
34						X	X												X
36						X	X												X
37									X										X
38									X										X

Abbildung D.3: Nach dem Vergleichsregelwerk zusammengehörige Fälle der Lagebeziehungen zwischen den Erreichbarkeits- und Belegtbereichsgrenzen

E Klothoidenapproximation

Klothoiden kommen beim Entwurf von Straßen- und Bahnverläufen zum Einsatz, um eine ruckfreie Fahrdynamik zu ermöglichen. Durch die Annahme, dass nur Einfädelsituationen auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen betrachtet werden, kann die Verwendung der Klothoiden und der Klothoidennäherung gerechtfertigt werden. Diese Funktionen zeichnen sich durch eine konstante Krümmungsänderung aus. Der Krümmungsradius r ändert sich dabei um einen proportionalen Faktor in Abhängigkeit von der Bogenlänge l :

$$a^2 = \frac{r}{l} \quad (\text{E.1})$$

Das führt dazu, dass sich die Krümmung c der Klothoide in Abhängigkeit der Bogenlänge ändert:

$$c(l) = c_0 + c_1 l \quad (\text{E.2})$$

Durch weitere Umformungen und Transformationen erhält man als exakte mathematische Beschreibung einer Klothoide in Parameterform:

$$x = a\sqrt{(\pi)} \int_0^t \cos \frac{\pi \xi^2}{2} d\xi \quad (\text{E.3})$$

$$y = a\sqrt{(\pi)} \int_0^t \sin \frac{\pi \xi^2}{2} d\xi, \text{ mit} \quad (\text{E.4})$$

$$t = \frac{L}{A\sqrt{\pi}}, \quad (\text{E.5})$$

wobei L die Länge des Bogens und A eine formgebende Konstante beschreiben. Mittels Taylorapproximation und einem Abbruch nach dem zweiten Term kann diese Darstellung durch folgende Funktionen angenähert werden:

$$x(l) = l - \frac{1}{6}c_0^2 l^3 \quad (\text{E.6})$$

$$y(l) = \frac{1}{2}c_0 l^2 + \frac{1}{6}c_1 l^3 \quad (\text{E.7})$$

Auf Autobahnen werden maximale Krümmungswerte von $c_0 = 800$ und maximale Krümmungsänderungswerte von $c_1 = 300$ angenommen. Ein Vergleich von Approximation und exakter Lösung zeigen, dass bei $l = 1/\sqrt{c_1}$ eine Abweichung von circa 3% durch die Anwendung der Approximation entsteht. Dieser Fehler ist für den Anwendungsfall der Beschreibung einer Kolonnenspur auf Autobahnen akzeptabel.

Hat man aufgrund der Darstellung der Kolonnenspur in einer Intervallkarte Paare von (x, y) Werten gegeben, so stellt sich die Frage nach einer Berechnungsvorschrift für das Abbilden als Klothoide. Gesucht sind die Werte für die Krümmung (c_0), die Krümmungsänderung (c_1), der Winkel zur Klothoide (φ) sowie der seitliche Versatz zu dieser (dy). Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Problem wie folgt aufgefasst:

$$y(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}x^2 & \frac{1}{6}x^3 & x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \tan(\varphi) \\ dy \end{bmatrix} \quad (\text{E.8})$$

Ist eine Menge von mindestens 4 Messpunkten (x, y) gegeben, kann die Klothoidennäherung durch das Lösen eines (über)bestimmten Gleichungssystems mit minimalem Fehlerquadrat berechnet werden. Allerdings darf die \underline{X}_{Mess} Matrix für eine korrekte Berechnung nicht singulär sein. Dazu bildet man aus \underline{X}_{Mess} die Pseudoinverse \underline{X}_{Mess}^+ (Vgl. Bronstein u. a. (2008)):

$$\vec{y} = \underline{X}_{Mess} \vec{K} \quad (\text{E.9})$$

$$\vec{K} = \underline{X}_{Mess}^+ \vec{y} \quad (\text{E.10})$$

$$\underline{X}_{Mess}^+ = (\underline{X}_{Mess}^T \underline{X}_{Mess})^{-1} \underline{X}_{Mess}^T \quad (\text{E.11})$$

Literaturverzeichnis

- [Althoff u. a. 2008a] ALTHOFF, M. ; STURSBURG, O. ; BUSS, M.: Erreichbarkeitsanalyse von Verkehrsteilnehmern zur Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2008
- [Althoff u. a. 2008b] ALTHOFF, M. ; STURSBURG, O. ; BUSS, M.: Online-Analyse von Fahrstrategien kognitiver autonomer Fahrzeuge. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2008, S. 314–330
- [Althoff u. a. 2008c] ALTHOFF, M. ; STURSBURG, O. ; BUSS, M.: Sicherheitsbewertung von Fahrstrategien kognitiver Automobile. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), S. 653–661
- [Althoff u. a. 2008d] ALTHOFF, M. ; STURSBURG, O. ; BUSS, M.: Stochastic reachable sets of interacting traffic participants. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande, 2008, S. 1086–1092
- [Althoff u. a. 2009] ALTHOFF, M. ; STURSBURG, O. ; BUSS, M.: Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving. In: *Intelligent Transportation Systems (ITS)* Bd. 10. Stockholm, Schweden, 2009, S. 299–310
- [Althoff 2010] ALTHOFF, Matthias: *Reachability Analysis and its Application to the Safety Assessment of Autonomous Cars*, Technische Universität München, Dissertation, 2010
- [Anderson u. a. 2008] ANDERSON, S. ; CACCIOLA, S. ; CURRIER, P. ; DALTON, A. ; FARMER, J. ; HURDUS, J. ; KIMMEL, K. ; KING, P. ; TAYLOR, A. ; COVERN, D. ; BACHA, A. ; WEBSTER, M. ; BAUMAN, C. ; FARUQUE, R. ; FLEMING, M. ; TERWELP, C. ; REINHOLTZ, C. ; HONG, D. ; WICKS, A. ; ALBERI, T.: Odin: Team VictorTango's Entry in the DARPA Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 8, S. 467–492
- [Aso und Kindo 2008] ASO, K. ; KINDO, T.: Stochastic decision-making method for autonomous driving system that minimizes collision probability. In: *FISITA World Automotive Congress*. München, 2008
- [Baer u. a. 2009] BAER, M. ; BOUZOURAA, M. E. ; DEMIRAL, C. ; HOFMANN, U. ; GIES, S. ; DIEPOLD, K.: EgoMaster: A central ego motion estimation for driver as-

- sistance systems. In: *International Conference on Control and Automation (ICCA)*. Christchurch, Neuseeland, 2009, S. 1708–1715
- [Basarke u. a. 2007] BASARKE, C. ; BERGER, C. ; CORNELSEN, K. ; DOERING, M. ; EFFERTZ, J. ; HOMEIER, K. ; LIPSKI, C. ; NOTHDURFT, T. ; WILLE, J. M.: DARPA Urban Challenge 2007 - Team CarOLO / Technische Universität Braunschweig. 2007. – Forschungsbericht
- [Bass u. a. 2003] BASS, L. ; CLEMENTS, P. ; KAZMAN, R.: *Software architecture in practice*. Addison-Wesley Professional, 2003. – ISBN 0321154959
- [BASt 2000] BAST: *Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland. Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland*. 2000
- [BASt 2010] BAST: *Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland. Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland*. 2010
- [Bellman 1972] BELLMAN, R.: *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1972. – ISBN 9780691079516
- [BGL 2007] BGL: *Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e.V. - Fahrzeugbestand Lkw und Pkw im Bundesgebiet 1950-2007*. 2007
- [Bishop 1995] BISHOP, C. M.: *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, 1995. – ISBN 0198538642
- [Botsch 2009] BOTSCH, M.-F.: *Machine learning techniques for time series classification*. Göttingen, Cuvillier Verlag, Dissertation, 2009
- [Botsch und Nossek 2007] BOTSCH, M.-F. ; NOSSEK, J. A.: Feature Selection for Change Detection in Multivariate Time-Series. In: *Symposium on Computational Intelligence and Data Mining*. Honolulu, Hawaii, 2007
- [Bouzouraa und Hofmann 2009] BOUZOURAA, M. E. ; HOFMANN, U.: Effiziente kartenbasierte Umfeldwahrnehmung mit Laserscanner-Sensoren für Fahrerassistenzsysteme. In: *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2009*. Löwenstein/Höflinsülz, 2009
- [Bouzouraa und Hofmann 2010] BOUZOURAA, M. E. ; HOFMANN, U.: Fusion of occupancy grid mapping and model based object tracking for driver assistance systems using laser and radar sensors. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 294–300
- [Bouzouraa 2012] BOUZOURAA, M.E.: *Belegungskartenbasierte Umfeldwahrnehmung in Kombination mit modellbasierten Ansätzen*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2012

- [Bouzouraa u.a. 2010] BOUZOURAA, M.E. ; REICHEL, M. ; SIEGEL, A. ; HOFMANN, U. ; SIEDERSBERGER, K.-H.: Grundlegende Architekturentscheidungen für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme am Beispiel einer Aktiven Gefahrenbremsung. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, April 2010
- [Bowman 2004] BOWMAN, C.: The Dual Node Network (DNN) Data Fusion & Resource Management (DF&RM) Architecture. In: *AIAA Intelligent Systems Conference*. Chicago, USA, 2004
- [Branz 2010] BRANZ, W.: Aktiv Abschlusspräsentation - Poster. Mendig, 2010
- [Breiman 1996] BREIMAN, L.: Out-of-bag Estimation / University of California, Berkeley. 1996. – Forschungsbericht
- [Breiman 2001] BREIMAN, L.: Random Forests. In: *Machine Learning* 45 (2001), Nr. 1, S. 5–32
- [Breiman u.a. 1984] BREIMAN, L. ; FRIEDMAN, J. H. ; OLSHEN, R. A. ; STONE, C. J.: *Classification and Regression Trees*. Chapman and Hall/CRC, 1984. – ISBN 0412048418
- [Broadhurst u.a. 2004] BROADHURST, A. ; BAKER, S. ; KANADE, T.: *A Prediction and Planning Framework for Road Safety Analysis, Obstacle Avoidance and Driver Information*. Pittsburgh : The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2004
- [Broadhurst u.a. 2005] BROADHURST, A. ; BAKER, S. ; KANADE, T.: Monte Carlo Road Safety Reasoning. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Las Vegas, USA, 2005, S. 319–324
- [Bronstein u.a. 2008] BRONSTEIN, I.N. ; SEMENDJAJEW, K. A. ; MUSIOL, G. ; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt a.M. : Deutsch Harri GmbH, 2008
- [Bundesamt 2007] BUNDESAMT, Statistisches: *Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006*. Juli 2007
- [Bundesdrucksache 2009] BUNDESDRUCKSACHE: 16/13850. Juli 2009
- [Campbell u.a. 2007] CAMPBELL, M. ; GARCIA, E. ; HUTTENLOCHER, D. ; MILLER, I. ; MORAN, P. ; NATHAN, A. ; SCHIMPF, B. ; ZYCH, N. ; CATLIN, J. ; CHELARESCU, F. u.a.: Team Cornell: Technical Review of the DARPA Urban Challenge Vehicle / DARPA. 2007. – Forschungsbericht
- [Chiellino u.a. 2010] CHIELLINO, U. ; WINKLE, Th. ; GRAAB, B. ; ERNSTBERGER, A. ; DONNER, E. ; NERLICH, M.: Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten? In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 3 (2010)
- [Chin u.a. 2005] CHIN, W. C. ; LEE, H. B. ; XIAO, X. H. ; NG, G. W. ; HOW, K. Y.: A group tracking algorithm for ground vehicle convoys. In: *Multisensor, Multisource*

- Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications* Bd. 5813. Orlando, USA, 2005, S. 150
- [Dagli 2005] DAGLI, I.: *Erkennung von Einscherer-Situationen für Abstandsregeltempomaten*, Universität Tübingen, Dissertation, 2005
- [Dagli u. a. 2003] DAGLI, I. ; BREUEL, G. ; SCHITTENHELM, H.: Einscherer-Erkennung mit erweiterter Umgebungserfassung - Eine Machbarkeitsstudie. In: *VDI-Berichte* 1794 (2003), S. 287–300
- [Dagli u. a. 2004] DAGLI, I. ; BREUEL, G. ; SCHITTENHELM, H. ; SCHANZ, A.: Cutting-In Vehicle Recognition for ACC-Systems - Towards Feasible Situation Analysis Methodologies. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Parma, Italien, 2004
- [Dagli u. a. 2002] DAGLI, I. ; BROST, M. ; BREUEL, G.: Action Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems Using Dynamic Belief Networks. In: *Conference of the agent technologies, infrastructures, tools and applications for e-services*. Erfurt, 2002, S. 179—194
- [Dagli und Reichardt 2002] DAGLI, I. ; REICHARDT, D.: Motivation-Based Approach To Behavior Prediction. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Versailles, Frankreich, 2002
- [Danielsson u. a. 2007] DANIELSSON, S. ; PETERSSON, L. ; EIDEHALL, A.: Monte Carlo Based Threat Assessment: Analysis and Improvements. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Istanbul, Türkei, 2007, S. 233–238
- [Darms 2007] DARMS, M.: *Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2007
- [DARPA 2008] DARPA: *Overview - What is the Urban Challenge?* 2008
- [Di Cairano u. a. 2007] DI CAIRANO, S. ; DU TOIT, N. ; FLORES, M. ; GONZALEZ, J. ; HOWARD, A. ; LINDZEY, L. ; MA, J. ; MURRAY, R. ; PETRAS, R. ; PFISTER, S. ; RIZZO, D. ; WONGPROMSARN, T. ; ALY, M. ; BURDICK, J. ; CARSON, V.: Sensing, Navigation and Reasoning Technologies for the DARPA Urban Challenge: Technical Paper Team Caltech. April 2007. – Forschungsbericht
- [Dickmans 1989] DICKMANS, E.-D.: Subject-object discrimination in 4D dynamic scene interpretation for machine vision. In: *Workshop on Visual Motion*. Irvine, USA, 1989, S. 298–304
- [Dijkstra 1959] DIJKSTRA, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), S. 269–271. – URL <http://jmvidal.cse.sc.edu/library/dijkstra59a.pdf>

- [Donges 1982] DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* 27, 1982, S. 183–190
- [Drosdowski und Dudenredaktion 1993] DROSDOWSKI, G. ; DUDENREDAKTION: *Duden, das große Fremdwörterbuch. Herkunft und Bedeutung der Fremdwörter*. Mannheim : Dudenverlag, 1993. – ISBN 9783411041619
- [Dudenredaktion 2009] DUDENREDAKTION: *Duden - die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der neuen amtlichen Regeln. Band 1*. 25., vollst. neu bearb. u. erw. Auflage. Mannheim : Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Juli 2009
- [DuToit u. a. 2008] DUTOIT, N. E. ; WONGPIROMSARN, T. ; BURDICK, J. W. ; MURRAY, R. M.: Situational reasoning for road driving in an urban environment. In: *International Workshop on Intelligent Vehicle Control Systems (IVCS)*. Madeira, Portugal, 2008
- [Eckerle und Schuierer 1994] ECKERLE, J. ; SCHUIERER, S.: Effiziente speicherplatzbeschränkte Graph-Such-Algorithmen / Institut für Informatik. Universität Freiburg, 1994. – Forschungsbericht
- [Eidehall und Petersson 2006] EIDEHALL, A. ; PETERSSON, L.: Threat assessment for general road scenes using monte carlo sampling. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Toronto, Kanada, 2006, S. 1173–1178
- [Eidehall und Petersson 2008] EIDEHALL, A. ; PETERSSON, L.: Statistical threat assessment for general road scenes using monte carlo sampling. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Peking, China, 2008, S. 137–147
- [Ferguson und Stentz 2005] FERGUSON, D. ; STENTZ, A.: Field D*: An Interpolation-based Path Planner and Replanner. In: *International Symposium on Robotics Research (ISRR)*. San Francisco, USA, 2005
- [FGSV 2000] FGSV: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Köln : FGSV Verlag, 2000
- [Fiore 2008] FIORE, Gaston: *A Robust Motion Planning Approach for Autonomous Driving in Urban Areas*, Massachusetts Institute of Technology, Master Thesis, 2008
- [Frazzoli u. a. 2007] FRAZZOLI, E. ; HUANG, A. ; JONES, T. ; KOCH, O. ; KUWATA, Y. ; MAHELONA, K. ; MOORE, D. ; MOYER, K. ; OLSON, E. ; PETERS, S. ; LEONARD, J. ; SANDERS, C. ; TEO, J. ; WALTER, M. ; BARRETT, D. ; HOW, J. ; TELLER, S. ; ANTONE, M. ; CAMPBELL, S. ; EPSTEIN, A. ; FIORE, G. ; FLETCHER, L.: MIT Technical Paper. April 2007. – Forschungsbericht
- [Freyer 2008] FREYER, J.: *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung*

- des Spurwechselverhaltens von ACC*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2008
- [Fritsch u. a. 2008] FRITSCH, J. ; MICHALKE, T. ; GEPPERTH, A. ; BONE, S. ; WAIBEL, F. ; KLEINEHAGENBROCK, M. ; GAYKO, J. ; GOERICK, C.: Towards a human-like vision system for driver assistance. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande, 2008, S. 275–282
- [Fuchs 2005] FUCHS, E.: *Overview on ProFusion 1 and 2*. Oktober 2005
- [Fuhao und Jiping 2009] FUHAO, Z ; JIPING, L: An alorithm of shortest path based on Dijkstra for huge data. In: *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Tianjin, China, 2009
- [GDV 2012] GDV: *Notbremsassistenten helfen Unfälle vermeiden*. Mai 2012. – URL <http://www.udv.de/fahrzeugsicherheit/pkw/fas/notbremsassistent/>
- [Gindele u. a. 2010] GINDELE, T. ; BRECHTEL, S. ; DILLMANN, R.: A Probabilistic Model for Estimating Driver Behaviors and Vehicle Trajectories in Traffic Environments. In: *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira, Portugal, 2010, S. 1625–1631
- [Gindele u. a. 2008] GINDELE, T. ; JAGSZENT, D. ; PITZER, B. ; DILLMANN, R.: Design of the planner of team AnnieWAY’s autonomous vehicle used in the DARPA Urban Challenge 2007. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande, 2008, S. 1131–1136
- [Goebl u. a. 2008a] GOEBL, M. ; ALTHOFF, M. ; BUSS, M. ; FÄRBER, G. ; HECKER, F. ; HEISSING, B. ; KRAUS, S. ; NAGEL, R. ; LEÓN, F. P. ; RATTEI, F. u. a.: Design and capabilities of the Munich Cognitive Automobile. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande, 2008, S. 1101–1107
- [Goebl und Färber 2007] GOEBL, M. ; FÄRBER, G.: A real-time-capable hard-and software architecture for joint image and knowledge processing in cognitive automobiles. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Istanbul, Türkei, 2007, S. 734–740. – ISBN 1424410673
- [Goebl u. a. 2008b] GOEBL, M. ; RATTEI, F. ; NEUMAIER, S. ; FÄRBER, G.: Eine leistungsfähige Hard-und Softwarearchitektur für kognitive Funktionen in Fahrzeugen. In: *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008*. Walting im Altmühltal, April 2008, S. 30–37
- [Gwehenberger u. a. 2008] GWEHENBERGER, J. ; DASCHNER, D. ; KUBITZKI, J.: Chancen und Risiken mit Fahrerassistenzsystemen - Aktuelle Erkenntnisse der AZT Unfallforschung. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2008
- [Hackenberger und Heißing 1982] HACKENBERGER, U. ; HEISSING, B.: Die fahrdyna-

- mischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. In: *ATZ 84 Heft 7/8* (1982)
- [Hamberger 1999] HAMBERGER, W.: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*, VDI Verlag, Dissertation, 1999
- [Hart u. a. 1968] HART, P.E. ; NILSSON, N.J. ; RAPHAEL, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: *Systems Science and Cybernetics* 4 (1968), Nr. 2, S. 100–107
- [Hastie u. a. 2001] HASTIE, T. ; TIBSHIRANI, R. ; FRIEDMAN, J.: *The Elements of Statistical Learning*. New York, USA : Springer-Verlag, 2001
- [Heckhausen und Heckhausen 2006] HECKHAUSEN, J. ; HECKHAUSEN, H.: Motivation und Handeln: Einführung und Überblick. In: *Motivation und Handeln*. Springer Verlag, 2006, S. 1–9. – ISBN 3540507469
- [Hermann 2007] HERMANN, A.: Fahrsituationsspezifische Datenverteilung im Verteilten Umgebungsmodell für Fahrzeugsoftware. In: *Lecture Notes in Informatics. Gesellschaft für Informatik Jahrestagung*. Bremen, 2007, S. 541–545
- [Hermann 2010] HERMANN, A.: *Situationsspezifische und proaktive Datenverteilung am Beispiel des verteilten Umgebungsmodells für Fahrzeugsoftware*, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Dissertation, 2010
- [Hermann und Desel 2008] HERMANN, A. ; DESEL, J.: Driving situation analysis in automotive environment. In: *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. Ohio, USA, 2008, S. 216–221
- [Hermann und Lutz 2007] HERMANN, A. ; LUTZ, S.: Situation based data distribution in a distributed environment model. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Istanbul, Türkei, 2007, S. 486–491
- [Hillenbrand 2007] HILLENBRAND, J.: *Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung*, Universität Fridericiana Karlsruhe, Dissertation, 2007
- [Hillenbrand u. a. 2005] HILLENBRAND, J. ; KROSCHEL, K. ; SCHMID, V.: Situation assessment algorithm for a collision prevention assistant. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Las Vegas, USA, 2005, S. 459–465
- [Hillenbrand u. a. 2006] HILLENBRAND, J. ; SPIEKER, A.M. ; KROSCHEL, K.: A Multilevel Collision Mitigation Approach—Its Situation Assessment, Decision Making, and Performance Tradeoffs. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC)* Bd. 7. Toronto, Kanada, 2006, S. 528–540
- [Hoeger 2009a] HOEGER, R.: *HAVEit Deliverable D12.1, Architecture*. 2009

- [Hoeger 2009b] HOEGER, R.: *Project HAVEit Presentation*. September 2009
- [Hofmann 2004] HOFMANN, U.: *Zur visuellen Umfeldwahrnehmung autonomer Fahrzeuge*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2004
- [Hohm 2010] HOHM, A.: Probandenstudie zur Ermittlung der Adequate Overtaking Margin (AOM) für die Fahrerassistenz in Überholsituationen. In: *56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. Darmstadt, 2010
- [Höhn 2008] HÖHN, R.: *Das V-Modell XT : Anwendungen, Werkzeuge, Standards*. Heidelberg : Springer, 2008. – ISBN 9783540302490
- [Hülnhagen u. a. 2010] HÜLNHAGEN, T. ; DENGLER, I. ; TAMKE, A. ; DANG, T. ; BREUEL, G.: Maneuver recognition using probabilistic finite-state machines and fuzzy logic. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 65–70
- [Hummel 2009] HUMMEL, B.: *Description Logic for Scene Understanding at the Example of Urban Road Intersections*, Technische Universität Karlsruhe, Dissertation, 2009
- [Hummel u. a. 2007] HUMMEL, B. ; THIEMANN, W. ; LULCHEVA, I.: Description Logic for Vision-Based Intersection Understanding. In: *Cognitive Systems with Interactive Sensors (COGIS)*. Stanford, USA, 2007
- [Hummel u. a. 2008] HUMMEL, B. ; THIEMANN, W. ; LULCHEVA, I.: Scene Understanding of Urban Road Intersections with Description Logic. In: COHN, A.G. (Hrsg.) ; HOGG, D.C. (Hrsg.) ; MÖLLER, R. (Hrsg.) ; NEUMANN, B. (Hrsg.): *Logic and Probability for Scene Interpretation*. Dagstuhl, Deutschland, 2008
- [Hurdus und Hong 2008] HURDUS, J. ; HONG, D.: Behavioral Programming with Hierarchy and Parallelism in the DARPA Urban Challenge and RoboCup. Seoul, Korea, 2008, S. 255–269
- [ifmo 2002] IFMO: *Zukunft der Mobilität - Szenarien 2020*. München : ifmo, 2002
- [ifmo 2010] IFMO: *Zukunft der Mobilität - Szenarien 2030*. München : ifmo, 2010
- [INVENT-Konsortium 2001] INVENT-KONSORTIUM: *INVENT Teilprojektdarstellung Vorausschauende Aktive Sicherheit*. 2001
- [Isermann u. a. 2009] ISERMANN, R. ; BENDER, E. ; BRUDER, R. ; DARMS, M. ; SCHORN, M. ; STÄHLIN, U. ; WINNER, H.: Antikollisionssystem PRORETA–Integrierte Lösung für ein unfallvermeidendes Fahrzeug. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, S. 632–646
- [Isermann u. a. 2008a] ISERMANN, R. ; SCHORN, M. ; STÄHLIN, U.: Anticollision system PRORETA with automatic braking and steering. In: *Vehicle System Dynamics* 46 Supplement (2008), S. 683–694. – ISSN 0042-3114

- [Isermann u. a. 2008b] ISERMANN, R. ; STÄHLIN, U. ; SCHORN, M.: Collision Avoidance System Proreta - Strategies Trajectory Control and Test Drives. In: *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Intelligent Control Systems and Optimization (ICINCO-ICSO)*. Mailand, Italien, 2008, S. 35–42
- [Isermann u. a. 2010] ISERMANN, Rolf ; SCHMITT, K. ; MANNALE, R.: Collision avoidance systems PRORETA: situation analysis and intervention control. In: *Advances in Automotive Control (IFAC)*. München, Juli 2010
- [Käfer u. a. 2010] KÄFER, E. ; HERMES, C. ; WÖHLER, C. ; KUMMERT, F. ; RITTER, H.: Recognition and Prediction of Situations in Urban Traffic Scenarios. In: *20th International Conference on Pattern Recognition*. Istanbul, Türkei, 2010, S. 4234–4237
- [Kammel u. a. 2008] KAMMEL, S. ; ZIEGLER, J. ; PITZER, B. ; WERLING, M. ; GINDELE, T. ; JAGZENT, D. ; SCHRÖDER, J. ; THUY, M. ; GOEBL, M. ; HUNDELSHAUSEN, F. von u. a.: Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 615–639
- [Karrenberg 2008] KARRENBURG, S.: *Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien*, DLR Braunschweig, Dissertation, 2008
- [Kastner u. a. 2010] KASTNER, R. ; MICHALKE, T. ; FRITSCH, J. ; GOERICK, C.: Towards a task dependent representation generation for scene analysis. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 731–737
- [KBA 2001] KBA: *Pressemitteilung: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Januar 2001*. 2001
- [KBA 2010] KBA: *Pressemitteilung: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Januar 2010*. 2010
- [Klein 2004] KLEIN, L.: *Sensor and Data Fusion : A Tool for Information Assessment and Decision Making*. Bellingham, USA : SPIE Press, 2004. – ISBN 9780819454355
- [Kluge und Seebold 1999] KLUGE, F. ; SEEBOLD, E.: *Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache*. 23., erw. Auflage. Berlin : de Gruyter, Januar 1999. – ISBN 3110163926
- [Kodaka u. a. 2003] KODAKA, K. ; OTABE, M. ; URAI, Y. ; KOLKE, H.: Rearend Collision Velocity Reduction System. In: *SAE World Congress and Exhibition 2003*. Detroit, USA, 2003
- [Kopischke 2000] KOPISCHKE, S.: *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2000
- [Kuehn u. a. 2009] KUEHN, M. ; HUMMEL, Th. ; BENDE, J.: Benefit Estimation of Advanced Driver Assistance Systems for Cars Derived From Real-Life Accidents. In:

- 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Stuttgart, 2009
- [Kuwata u.a. 2008a] KUWATA, Y. ; FIORE, G. ; TEO, J. ; FRAZZOLI, E. ; HOW, J.: Motion Planning for Urban Driving using RRT. In: *Intelligent Robots and Systems*. Nizza, Frankreich, 2008, S. 1681–1686
- [Kuwata u.a. 2009] KUWATA, Y. ; TEO, J. ; FIORE, G. ; KARAMAN, S. ; FRAZZOLI, E. ; HOW, J.: Real-Time Motion Planning With Applications to Autonomous Urban Driving. In: *Control Systems Technology* 17 (2009), Nr. 5, S. 1105–1118
- [Kuwata u.a. 2008b] KUWATA, Y. ; TEO, J. ; KARAMAN, S. ; FIORE, G. ; FRAZZOLI, E. ; HOW, J.: Motion Planning in Complex Environments using Closed-loop Prediction. In: *Guidance, Navigation, and Control Conference (AIAA)*. Honolulu, Hawaii, 2008
- [Langenscheidtredaktion 2010] LANGENSCHIEDTREDAKTION: *Fremdwörterbuch online*. <http://services.langenscheidt.de/cgi-bin/fremdwb/searchfw.pl>, 2010
- [Lauer und Botsch 2010] LAUER, C. ; BOTSCH, M.-F.: Complexity Reduction Using the Random Forest Classifier in a Collision Detection Algorithm. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010
- [Lavalley 1998] LAVALLEY, S. M.: Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning / TR 98-11, Computer Science Dept., Iowa State University. 1998. – Forschungsbericht
- [Liggins 2009] LIGGINS, M.: *Handbook of multisensor data fusion : theory and practice*. 2nd ed. Boca Raton FL : CRC Press, 2009. – ISBN 9781420053081
- [Lulcheva u.a. 2008] LULCHEVA, I. ; HUMMEL, B. ; BACHMANN, A.: Probabilistische Objektklassifikation für Verkehrsszenen. In: *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008*. Walting im Altmühltal, 2008
- [Luth und Wendt 1998] LUTH, H. ; WENDT, W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Thun : Verlag Harri Deutsch, 1998
- [Maas und Leicht 2005] MAAS, A. ; LEICHT, H.: *Verfahren und Vorrichtung zur Fahrerunterstützung, Patentnummer 102005022663*. 2005
- [Marco 2000] MARCO, D.: *Building and managing the meta data repository*. Wiley, 2000. – ISBN 0471355232
- [Maurer 2000] MAURER, M.: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*, VDI Verlag, Dissertation, 2000
- [Maurer u. a. 1996] MAURER, M. ; BEHRINGER, R. ; FÜRST, S. ; THOMANEK, F. ; DICKMANN, E. D.: A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. In: *13th International Conference on Pattern Recognition*. Wien, Österreich, 1996

- [Maurer und Wörsdörfer 2002] MAURER, M. ; WÖRSDÖRFER, K. F.: Unfallschwereminderung durch Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung – Potentiale und Risiken. In: *Unterlagen zum Seminar „Fahrerassistenzsysteme und aktive Sicherheit“*. Haus der Technik, Essen, 2002
- [MDR Redaktion 2011] MDR REDAKTION: *Ramsauer verspricht 100 Millionen gegen Schlaglöcher / MDR.DE*. Januar 2011
- [Meitinger 2009] MEITINGER, K.-H.: *Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen*, Technische Universität München, Dissertation, 2009
- [Mergel 2009] MERGEL, A.: *Comparison of stochastic reachability analysis and Monte Carlo simulation for the safety assessment of road scenes*, Technische Universität München, Bachelor Thesis, 2009
- [Michalke u. a. 2010] MICHALKE, T. ; FRITSCH, J. ; GOERICK, C.: A biologically-inspired vision architecture for resource-constrained intelligent vehicles. In: *Computer Vision and Image Understanding* Bd. 114. Madeira, Portugal, 2010, S. 548–563
- [Michalke u. a. 2009] MICHALKE, T. ; KASTNER, R. ; FRITSCH, J. ; GOERICK, C.: Towards a proactive biologically-inspired advanced driver assistance system. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Xi'an, China, 2009, S. 621–628
- [Michon 1985] MICHON, J. A.: A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do. In: *Human behavior and traffic safety*. New York, USA : Plenum Press, 1985, S. 485–520
- [Mitschke und Wallentowitz 2004] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4., neubearbeitete Auflage. Berlin : Springer, 2004 (VDI). – ISBN 3540420118
- [Mitsubishi 1995] MITSUBISHI, Motors C.: *Preview Distance Control*. 1995. – URL http://www.hido.or.jp/ITSHP_e/wi/itshb/Preview.htm
- [Murphy-Chutorian und Trivedi 2010] MURPHY-CHUTORIAN, E. ; TRIVEDI, M. M.: Head pose estimation and augmented reality tracking: an integrated system and evaluation for monitoring driver awareness. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)* Bd. 11. Madeira, Portugal, 2010, S. 300–311
- [Nitz 2010] NITZ, G.: *Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen*, Shaker Verlag, Dissertation, Februar 2010
- [Nitz und Zahn 2008] NITZ, G. ; ZAHN, P.: Nutzergerechte Eingriffsstrategien für ein aktives Gefahrenbremsystem. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik*. Aachen, 2008
- [OECD 2010] OECD: *Pressemitteilung: A Record Decade for Road Safety*. Sep-

- tember 2010. – URL <http://internationaltransportforum.org/Press/PDFs/2010-09-15IRTAD.pdf>
- [Park u.a. 2006] PARK, S. B. ; TANGO, F. ; AYCARD, O. ; POLYCHRONOPOULOS, A. ; SCHEUNERT, U. ; TATSCHKE, T.: ProFusion 2 – Sensor Data Fusion for Multiple Active Safety Applications. In: *Intelligent Transport Systems and Services*. London, Großbritannien, 2006
- [Pellkofer 2003] PELLKOEFER, M.: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*. München, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2003
- [Pfeiffer und Franke 2010] PFEIFFER, D. ; FRANKE, U.: Efficient representation of traffic scenes by means of dynamic stixels. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 217–224
- [Pietzsch u.a. 2009] PIETZSCH, S. ; VU, T. D. ; BURLET, J. ; AYCARD, O. ; HACKBARTH, T. ; APPENRODT, N. ; DICKMANN, J. ; RADIG, B.: Results of a precrash application based on laser scanner and short-range radars. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)* Bd. 10. St. Louis, USA, 2009, S. 584–593
- [Pollard u.a. 2008] POLLARD, E. ; PANNETIER, B. ; ROMBAUT, M.: A particle-filtering approach to convoy tracking in the midst of civilian traffic. In: *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVII*. Orlando, USA, 2008
- [Pollard u.a. 2010a] POLLARD, E. ; ROMBAUT, M. ; PANNETIER, B.: Bayesian Networks vs. Evidential Networks: An Application to Convoy Detection. In: HÜLLERMEIER, E. (Hrsg.) ; KRUSE, R. (Hrsg.) ; HOFFMANN, F. (Hrsg.): *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Methods* Bd. 80. Berlin : Springer Verlag, 2010, S. 31–39. – ISBN 978-3-642-14055-6
- [Pollard u.a. 2010b] POLLARD, E. ; ROMBAUT, M. ; PANNETIER, B.: Performances in Multitarget Tracking for Convoy Detection over Real GMTI data. In: *Information Fusion*. Edinburgh, Großbritannien, 2010
- [Radusch und Rechner 2010] RADUSCH, I. ; RECHNER, H.: simTD: A Car-to-X System Architecture for Field Operational Tests. In: *IEEE Communications Magazine* (2010), S. 149
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 13 (1983), Nr. 3, S. 257–266
- [Rauch u.a. 2009] RAUCH, N. ; KAUSSNER, A. ; KRÜGER, H. P. ; BOVERIE, S. ; FLEMISCH, F.: The importance of driver state assessment within highly automated vehicles. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. St. Louis, USA, 2009

- [Reichel u. a. 2010a] REICHEL, M. ; BOTSCH, M.-F. ; RAUSCHECKER, R. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; MAURER, M.: Situation Aspect Modelling and Classification Using the Scenario Based Random Forest Algorithm for Convoy Merging Situations. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Madeira, Portugal, 2010
- [Reichel u. a. 2010b] REICHEL, M. ; BOUZOURAA, M.E. ; SIEGEL, A. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; MAURER, M.: Erweiterte Umfelderkennung und Nutzung einer Ausweichanalyse als Grundlage einer aktiven Gefahrenbremsung. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2010
- [Reif 2009] REIF, K.: *Automobilelektronik – Eine Einführung für Ingenieure*. Wiesbaden : ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [Reinisch u. a. 2010] REINISCH, P. ; ZAHN, P. ; SCHRAMM, D.: Using a Reaction Time Model for Determining a Collision Avoidance System's Brake Timing. In: *Advances in Automotive Control (IFAC)*. München, 2010
- [Robbins und Monro 1951] ROBBINS, H. ; MONRO, S.: A stochastic approximation method. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 22 (1951), Nr. 3, S. 400–407
- [Rong Li 2002] RONG LI, X.: Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. In: *Transactions on aerospace and electronic systems* 39 (2002), Nr. 4, S. 1333–1364
- [Rosenblatt 1997] ROSENBLATT, J.K.: *DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation*, Dissertation, April 1997
- [Salaria 2004] SALARIA, K.: Object aggregation using merge-at-a-point algorithm. In: *Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications*. Orlando, USA, 2004, S. 287–294
- [Salaria 2005] SALARIA, K.: Situation assessment for aggregated vehicle merging at an unknown location. In: *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIV*. Orlando, USA, 2005, S. 367–377
- [Sandkühler 2008] SANDKÜHLER, D.: *Automatische Fahrzeuglängsführung unter Berücksichtigung situationsspezifischen Fahrerverhaltens*. Aachen, Institut für Kraftfahrzeugwesen, Dissertation, 2008
- [Sandkühler und Benmimoun 2004] SANDKÜHLER, D. ; BENMIMOUN, A.: Verkehrssituationserkennung: Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und Anwendung. In: *VDI-Tagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg, 2004, S. 169–186
- [Schaub u. a. 2011] SCHAUB, A. ; BREMBECK, J. ; BURSCHKA, D. ; HIRZINGER, G.: Robotisches Elektromobil mit kamerabasiertem Autonomieansatz. In: *ATZ online* 2 (2011)

- [Schäuffele und Zurawka 2006] SCHÄUFFELE, J. ; ZURAWKA, T.: *Automotive Software Engineering*. 3. Wiesbaden : ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg Verlag, 2006
- [Schmidt u. a. 2005] SCHMIDT, C. ; OECHSLE, F. ; BRANZ, W.: Untersuchungen zu letztmöglichem Ausweichmanövern für stehende und bewegte Hindernisse. In: *3. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2005*. Walting im Altmühltal, 2005
- [Schmidt u. a. 2006] SCHMIDT, C. ; OECHSLE, F. ; BRANZ, W.: Research on trajectory planning in emergency situations with multiple objects. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Toronto, Kanada, 2006, S. 988 – 992
- [Schmitt u. a. 2010] SCHMITT, K. ; MANNALE, R. ; ISERMANN, R.: Situation Analysis, Warnings and Emergency Braking for Collision Avoidance in Overtaking Situations - PRORETA 2. In: *Advances in Automotive Control (IFAC)*. München, Juli 2010
- [Schubert u. a. 2009] SCHUBERT, R. ; SCHULZE, K. ; WANIELIK, G.: Fahrzeugumfeldererkennung und probabilistische Modellierung von Manöverentscheidungen. In: *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2009*. Löwenstein/Höcklinsulz, 2009
- [Schubert u. a. 2010] SCHUBERT, R. ; SCHULZE, K. ; WANIELIK, G.: Situation Assessment for Automatic Lane-Change Maneuvers. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC)* Bd. 11. Madeira, Portugal, 2010, S. 607–616
- [Schubert und Wanielik 2009] SCHUBERT, R. ; WANIELIK, G.: Unifying Bayesian networks and IMM filtering for improved multiple model estimation. In: *12th International Conference on Information Fusion*. Seattle, USA, 2009, S. 810–817
- [Schubert und Wanielik 2010] SCHUBERT, R. ; WANIELIK, G.: A unified bayesian approach for tracking and situation assessment. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 738–745
- [Schubert u. a. 2008] SCHUBERT, R. ; WANIELIK, G. ; SCHULZE, K.: Erfassung und Bewertung des Fahrzeugumfelds zur automatischen Durchführung von Spurwechselmanövern. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. München, 2008, S. 139–152
- [Schulze u. a. 2006] SCHULZE, M. ; IRION, J. ; MÄKINEN, T. ; FLAMENT, M.: Functional requirements and system architecture for preventive safety applications. In: *Transport Research Area Europe (TRA)*. Göteborg, Schweden, 2006
- [Seeck und Gasser 2006] SEECK, A. ; GASSER, T.M.: Deutsche und völkerrechtliche Rahmenbedingungen moderner FAS. In: *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2006
- [Sengbusch 2010] SENGBUSCH, J.: Leonie braucht keinen Fahrer. In: *Frankfurter Rundschau, Teil Wissenschaft* (2010)
- [Siedersberger 2003] SIEDERSBERGER, K.-H.: *Komponenten zur automatischen Fahr-*

- zeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen. München, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2003
- [Stählin 2008] STÄHLIN, U.: *Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*. Düsseldorf, Dissertation, 2008
- [Stählin u. a. 2006] STÄHLIN, U. ; SCHORN, M. ; ISERMANN, R.: Notausweichen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung. In: *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren (AUTOREG)*. Wiesloch, 2006, S. 197–206
- [Starke 2009] STARKE, G.: *Effektive Software-Architekturen: Ein praktischer Leitfaden*. München : Hanser Verlag, 2009
- [StatBA 2010a] STATBA: *Statistisches Bundesamt Deutschland - Lange Reihe zu Straßenverkehrsunfällen und Verunglückten*. 2010
- [StatBA 2010b] STATBA: *Statistisches Bundesamt Deutschland - Lange Reihe zur Bevölkerung in Deutschland*. 2010
- [Steinberg und Bowman 2004] STEINBERG, A. N. ; BOWMAN, C. L.: Rethinking the JDL data fusion levels. In: *National Symposium on Sensor and Data Fusion (NSSDF)*. Baltimore, USA, 2004
- [Stentz 1994] STENTZ, A.: Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. In: *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. San Diego, USA, 1994
- [Stiller und Gayko 2008] STILLER, C. ; GAYKO, J.: Kognitive Automobile. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), Nr. 11, S. 551–553
- [Stiller und Lulcheva 2008] STILLER, C. ; LULCHEVA, I.: Probabilistische Inferenz für Kognitive Automobile. In: *18. Workshop Computational Intelligence*. Dortmund, 2008, S. 1–14
- [Stiller u. a. 2008a] STILLER, Ch. ; KAMMEL, S. ; LULCHEVA, I. ; ZIEGLER, J.: Probabilistische Methoden in der Umfeldwahrnehmung Kognitiver Automobile. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 (2008), November, Nr. 11, S. 563 – 574
- [Stiller u. a. 2008b] STILLER, Ch. ; KAMMEL, S. ; PITZER, B. ; ZIEGLER, J. ; WERLING, M. ; GINDELE, T. ; JAGSZENT, D.: Team AnnieWAY's Autonomous System. In: SOMMER, G. (Hrsg.) ; KLETTE, R. (Hrsg.): *Robot Vision - Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag, 2008, S. 248–259. – ISBN 978-3-540-78156-1
- [Stolzmann u. a. 2010] STOLZMANN, Dr. W. ; PROETTEL, Andreas ; SOKOLL, Ann: Reaktionszeitdifferenzen bei aufmerksamen und abgelenkten Fahrern. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2010
- [Tamke u. a. 2010] TAMKE, A. ; DANG, T. ; BREUEL, A.: Integrierte Simulations-

- und Entwicklungsumgebung für die Ausweichassistentz zum Fußgängerschutz. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2010
- [Tatschke u. a. 2006] TATSCHKE, T. ; PARK, S. B. ; AMDITIS, A. ; POLYCHRONOPOULOS, A. ; SCHEUNERT, U. ; AYCARD, O.: ProFusion2 - towards a Modular, Robust and Reliable Fusion Architecture for Automotive Environment Perception. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications* (2006), S. 451–469
- [Thomas u. a. 2008] THOMAS, B. ; LOWENAU, J. ; DUREKOVIC, S. ; OTTO, H. U.: The ActMAP-FeedMAP framework A basis for in-vehicle ADAS application improvement. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande, 2008, S. 263–268
- [Thrun 2010] THRUN, S.: *What we're driving at*. <http://googleblog.blogspot.com/2010/10/what-were-driving-at.html>. 2010
- [Thuy u. a. 2008] THUY, M. ; GOEBL, M. ; RATTEI, F. ; ALTHOFF, M. ; OBERMEIER, F. ; HAWE, S. ; NAGEL, R. ; KRAUS, S. ; WANG, C. ; HECKER, F. u. a.: Kognitive Automobile - Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereiches/Transregio 28. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. München, Deutschland, 2008
- [Tölle 1996] TÖLLE, W.: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Düsseldorf, VDI Verlag, Dissertation, 1996
- [Ullman 2006] ULLMAN, D.G.: *Making robust decisions: Decision management for technical, business, and service teams*. Trafford on Demand Pub, 2006. – ISBN 142510956X
- [Vacek u. a. 2007a] VACEK, S. ; GINDELE, T. ; ZOLLNER, J. M. ; DILLMANN, R.: Situation classification for cognitive automobiles using case-based reasoning. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Istanbul, Türkei, 2007, S. 704–709
- [Vacek u. a. 2007b] VACEK, S. ; GINDELE, T. ; ZOLLNER, J. M. ; DILLMANN, R.: Using case-based reasoning for autonomous vehicle guidance. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS)*. San Diego, USA, 2007, S. 4271–4276
- [Van Doorn u. a. 2007] VAN DOVERN, D. ; REINHOLTZ, C. ; WEBSTER, M. ; WICKS, A. ; ALBERI, Th. ; ANDERSON, D. ; BACHA, A. ; BAUMAN, C. ; CACCIOLA, S. ; CURIER, P. ; FARUQUE, R. ; DALTON, A. ; FARMER, J. ; FLEMING, M. ; FRASH, S. ; GOTHING, G. ; HURDUS, J. ; KIMMEL, S. ; SHARKEY, C. ; TAYLOR, A. ; TERWELP, C.: DARPA Urban Challenge Technical Paper: Viktor Tango. April 2007. – Forschungsbericht
- [Vogel u. a. 2005] VOGEL, O. ; ARNOLD, I. ; CHUGHTAI, A. ; IHLER, E. ; MEHLING, U. ; NEUMANN, T. ; VÖLTER, M. ; ZDUN, U.: *Software-Architektur*. Elsevier, Spektrum Akad. Verl., 2005

- [Wicks u. a. 2008] WICKS, A. ; REINHOLTZ, C. ; HURDUS, J. ; BACHA, A. ; BAUMAN, C. ; CACCIOLA, S. ; FARUQUE, R. ; KING, P. ; TERWELP, C. ; CURRIER, P. ; HONG, D.: VictorTango Architecture for Autonomous Navigation in the DARPA Urban Challenge. In: *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 5 (2008)
- [Wikipedia 2010] WIKIPEDIA: <http://de.wikipedia.org/wiki/Situation>. 2010
- [Wille 2012] WILLE, J. M.: *Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung in innerstädtischen Szenarien am Beispiel des Stadtpilotprojekts*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2012
- [Wille und Form 2008] WILLE, J. M. ; FORM, T.: Low Level Control in a Modular System Architecture for Realizing Precise Driving Maneuvers of the Autonomous Vehicle Caroline. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Peking, China, 2008, S. 705–710
- [Wille u. a. 2009a] WILLE, J. M. ; MATTHAEI, R. ; OHL, S. ; SAUST, F. ; MAURER, M. ; SCHUMACHER, W. ; HOMEIER, K. ; NOTHDURFT, T. ; SASSE, A. ; HECKER, P. ; WOLF, L.: Der Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2009
- [Wille u. a. 2010a] WILLE, J. M. ; NOTHDURFT, T. ; SAUST, F. ; HECKER, P. ; MAURER, M.: Projekthaus Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*. Wolfsburg, 2010
- [Wille u. a. 2009b] WILLE, J. M. ; SAUST, F. ; MAURER, M.: Segmentübergreifende Bahnplanung mittels eines analytischen Optimierungsverfahrens für die autonome Fahrzeugführung auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2009*. Löwenstein/Höflinsulz, 2009
- [Wille u. a. 2010b] WILLE, J. M. ; SAUST, F. ; MAURER, M.: Comprehensive Treated Sections in a Trajectory Planner for Realizing Autonomous Driving in Braunschweig's Urban Traffic. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Madeira, Portugal, 2010
- [Wille u. a. 2010c] WILLE, J. M. ; SAUST, F. ; MAURER, M.: Stadtpilot: Driving Autonomously on Braunschweig's Inner Ring Road. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, USA, 2010, S. 506–511
- [Windeck 2010] WINDECK, Ch.: *Berliner Forscher zeigen autonomes Auto*. <http://heise.de/-1107067>. Oktober 2010
- [Winkle u. a. 2007] WINKLE, T. ; WALZ, R. ; SCHWARZ, J.: RESPONSE 3 - Code of Practice für die Entwicklung, Kalibrierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. In: *VDA Technischer Kongress*. Sindelfingen, 2007

- [Wongpiromsarn 2009] WONGPIROMSARN, T.: *Tichakorn Wongpiromsarn's Homepage*. <http://www.cds.caltech.edu/~nok/index.html>. 2009
- [Wongpiromsarn und Murray 2008] WONGPIROMSARN, T. ; MURRAY, R.: Distributed Mission and Contingency Management for the DARPA Urban Challenge. In: *Intelligent Vehicle Control Systems (IVCS)*. Madeira, Portugal, Oktober 2008

Eigene Publikationen und betreute Arbeiten

- [Entin u. a. 2009] ENTIN, V. ; REICHEL, M. ; SIEGL, S. ; KERN, A. ; MEYER-WEGENER, K.: A Scenario-Centric Approach for the Definition of the Formal Test Specifications of Reactive Systems. In: *Testing: Academic and Industrial Conference - Practice and Research Techniques (TAIC PART)*. Windsor, Großbritannien, 2009, S. 179–183
- [Fischer 2010] FISCHER, K.: *Situationsanalyse für kombinierte Lenk- und Bremsmanöver in Notsituationen*. Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [Klein 2010] KLEIN, S.: *Ansätze zur Verhaltensgenerierung von den Finalteams der DARPA Urban Challenge 2007*. Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [König 2010] KÖNIG, V.: *Prädiktion dynamischer Verkehrsteilnehmer in der statischen Fahrzeugumgebung*. Otto von Guericke Universität Magdeburg, Master Thesis, 2010
- [Rauschecker 2010] RAUSCHECKER, R.: *Erkennung von Einfädelsituationen im Stau*. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2010
- [Reichel u. a. 2010a] REICHEL, M. ; BOTSCH, M.-F. ; RAUSCHECKER, R. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; MAURER, M.: Situation Aspect Modelling and Classification Using the Scenario Based Random Forest Algorithm for Convoy Merging Situations. In: *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Madeira, Portugal, 2010
- [Reichel u. a. 2010b] REICHEL, M. ; BOUZOURAA, M.E. ; SIEGEL, A. ; HOFMANN, U. ; SIEDERSBERGER, K.-H.: Grundlegende Architekturentscheidungen für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme am Beispiel einer Aktiven Gefahrenbremsung. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2010
- [Reichel u. a. 2010c] REICHEL, M. ; BOUZOURAA, M.E. ; SIEGEL, A. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; MAURER, M.: Erweiterte Umfelderkennung und Nutzung einer Ausweichanalyse als Grundlage einer aktiven Gefahrenbremsung. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2010
- [Rosenkranz 2010] ROSENKRANZ, J.: *Situationsanalyse für FAS - Bestimmung einer Ausweichempfehlung in kritischen Autobahnszenarien*. Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010